

오염물 이송 및 확산 거동 해석모형의 특성비교연구

Comparative Study for Pollutant Transport and Diffusion Model

정성태*, 류시완**, 김영도***, 서일원****

Sungtae Jung, Siwan Lyu, Young Do Kim, Il won Seo

요 지

현재까지 우리나라에서 주로 사용되고 있는 2차원 흐름 해석모형은 미연방 도로국(U.S. Federal Highway Administration)과 연계하여 Brigham Young University에서 개발된 SMS(Surface-Water Modeling System) 모형이다. SMS모형 중 이송 확산 모형으로는 RMA-4가 포함되나 이 모형은 최신 수치기법을 반영하지 못하는 등의 문제점들로 인해 실제 물리적 현상 모의에 있어서 한계를 가지고 있다. 따라서 물리적 현상에 대한 적절한 모의를 위한 개선과정을 통하여 RAM4가 개발되었다.

본 연구에서는 현장실측 자료를 바탕으로 RMA-4와의 모의결과 비교를 통하여 오염 확산 해석모형인 RAM4의 적용성을 검증하고자 하였다. RAM4와 RMA-4 모의에 있어서 격자구성과 경계조건은 동일하게 설정하였으며, 유량조건은 평수량과 갈수량으로 선정하였다. 각각의 유량시 수위조건이 틀려지므로 각 유량조건에 대한 격자구성을 달리하였다.

모의구간은 낙동강 본류의 수산대교에서 삼랑진 철교까지의 약 13km 구간을 대상으로 하였다. 모의 구간 내에는 밀양-하남 하수처리장이 상류 좌안측에 위치하고 있고, 만곡, 단면의 축소 및 확대, 하중도, 합류 등의 지형학적 특징들이 비교적 짧은 구간에 나타나고 있어 모형의 검증에 적합하다고 판단된다.

핵심용어 : 이송 및 확산 거동, RAM4, RMA-4, 낙동강

1. 서론

자연하천에 유입된 오염물질의 이송-확산의 과정은 유입된 하천의 흐름이나 지형적 특성에 매우 민감하게 반응한다. 이러한 반응을 예측하는 모형으로써, 현재 우리나라에 주로 사용되고 있는 것은 RMA-4 모형이다. 그러나 모형엔진의 노후화 및 각종 문제점들로 인해 실질적인 물리적 현상에 한계를 가지고 있다. 이러한 물리적 현상을 보다 적절히 모의하기 위해 RAM4가 개발되었다(이명은, 2007). 그러나 개발 초기인 만큼 여러 가지 지형적 특성을 가진 다양한 구간에 적용하여 그 모의성능을 검증할 필요가 있다.

본 연구에서는 모형의 검증을 위해 낙동강 본류 중 수산대교에서 하구언까지 약 58.4 km 구간을 선정하고, 실측데이터를 기준으로 RMA-4와 RAM4를 비교하여 RAM4의 모의능력을 검증하였다. 모의 구간 내에는 시작점부터 약 13 km 이내에는 만곡, 단면의 축소 및 확대, 하중도, 합류 등의 지형학적 특징들이 비교적 짧은 구간에 나타나고 있고, 이후 만곡부가 교호적으로 나타나고 있어 모형의 검증에 적합하다고 판단된다.

본 연구에 앞서 팔당호 및 팔당댐 하류부터 잠실 수중보까지에 대한 RAM4 적용을 통하여 각종 오염사고 등에 대비하여 팔당호 및 팔당댐 하류의 각 취수장에서의 취수 방안을 제시한 예가 있다(송창근, 2006; 최남정, 2007).

2. 이론적 배경

2.1 지배방정식

2.1.1 RMA-4

* 정회원 창원대학교 토목공학과 대학원 석사과정 E-mail : jst9711@hotmail.com

** 정회원 창원대학교 토목공학과 조교수 E-mail : siwan@changwon.ac.kr

*** 정회원 인제대학교 환경공학과 조교수 E-mail : ydkim@inje.ac.kr

**** 정회원 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 E-mail : seoilwon@snu.ac.kr

RMA-4 모형은 비압축성 유체에서 보존성 물질의 3차원 이송-확산 방정식을 중·횡방향에 대하여 수심 적분한 2차원 이송-확산 방정식을 지배방정식으로 사용하며 이는 다음 식과 같다.

$$h \left(\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} - K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \sigma + kc \right) = 0 \quad (1)$$

여기서, C 물질의 농도, K_x 와 K_y 는 각 각 종분산계수와 횡분산계수이며, σ 는 물질의 질량 공급원, k 는 생·화학적 반응에 의한 물질의 소멸율을 나타낸다(오정선,2004).

2.1.2 RAM4(이명은,2007)

반응항과 생성·소멸항을 포함하는 RAM4의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) - \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - khC - Q = 0 \quad (2)$$

여기서 C 는 수심 적분된 농도로서 사용자가 구하고자 하는 값이다. u 와 v 는 수심적분된 유속이고, h 는 수심이다. k 는 반응성 오염물질의 감쇄계수이며, Q 는 생성 또는 소멸 함수이다. D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} , D_{yy} 는 각 분산계수 텐서의 요소들로서 다음의 방정식에 의해 결정된다.

$$D_{xx} = D_L \frac{u^2}{U^2} + D_T \frac{v^2}{U^2}, \quad D_{xy} = D_{yx} = (D_L - D_T) \frac{uv}{U^2}, \quad D_{yy} = D_T \frac{u^2}{U^2} + D_L \frac{v^2}{U^2} \quad (3)$$

여기서 U 는 합유속 벡터의 크기($\sqrt{u^2 + v^2}$)이며 D_L 은 종분산계수, D_T 는 횡분산계수로 사용자에 의해 입력된 값으로 정의된다.

3. 모의 과정

3.1 대상구간(낙동강 유역종합 치수계획 보고서, 2004)

낙동강 유역은 동경 127° 29' ~ 129° 18', 북위 35° 03' ~ 37° 13' 사이의 한반도 동남부에 위치하며 북쪽으로는 한강 유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강 유역과 접하고 동쪽으로는 태백산맥이 동해안 유역과 분수령을 형성하고 있는 우리나라 제 2의 유역으로서, 그 유역면적은 남한면적의 25.9 %인 23,384.21 km², 유로연장은 510.36 km이다. 그 중 본 연구에 사용된 구간은 경상남도 밀양시 하남읍의 수산대교에서부터 낙동강 하구언까지이며 구간 내 유로연장은 58.4 km이다. 모의구간 내에는 경상남도 밀양시 삼랑진읍에서 낙동강과 밀양강의 합류부가 있고, 동시에 하중도(탄섬)가 있다. 이 후 사행을 거듭하며 약 24.7 km를 유하하여, 경상남도 양산시 물금읍에서 양산천과 합류한 후 낙동강 하구언까지 약 20 km정도 유하하여 남해로 빠져나간다.

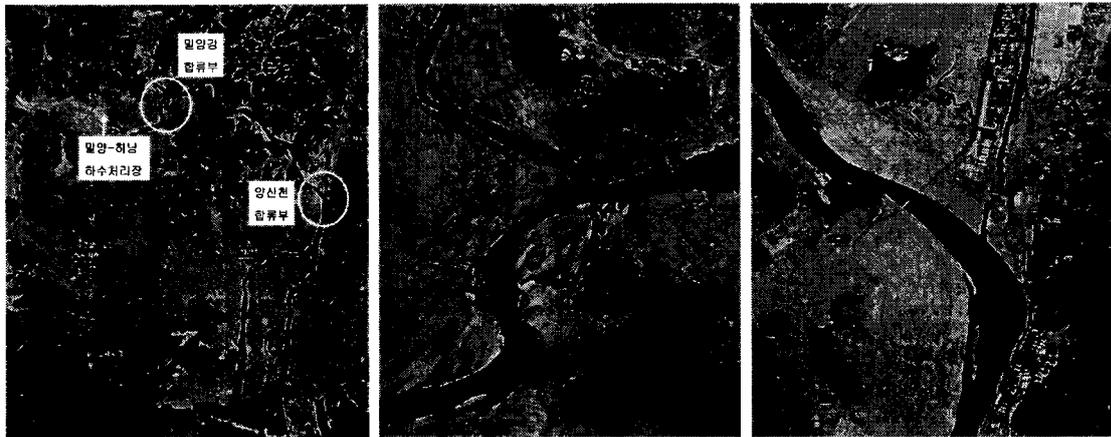
밀양강은 울산광역시 울주군 상북면 소호리 고현산(EL. 1,032.8 m)에서 발원하여 북류하다 범곡천을 합류한 후 경주시 산내면 내일리에서 유향을 서쪽으로 바꾸어 감촌천, 직현천을 합류한 후 운문담에 유입한다. 운문담에 유입한 유량은 사행을 거듭하며 남류 하면서 청도천을 합류한 후 밀양시 산외면 금천리 지점에서 단장천과 합류한 후 밀양시를 관류하여 낙동강 본류에 유입하는 하천으로, 유역면적과 유로연장은 각각 1,421.26 km², 101.50 km이다. 본 연구에서는 낙동강 합류점에서부터 약 5.4 km 구간을 모의구간으로 적용하였다.

양산천은 경상남도 양산시 하북면 지산리 취서산(EL. 1,058.9 m)에서 발원하여 남류 하면서 내석천, 유산천, 북부천, 다방천 등의 지류를 합류한 후 낙동강 본류에 유입하며, 유역면적과 유로연장은 각각 242.22 km², 32.30 km이다. 본 연구에서는 낙동강 합류점으로부터 약 1.4 km 구간을 모의구간으로 적용하였다.

밀양-하남 하수처리장은 경상남도 밀양시 하남읍 수산리 131-1에 위치하고 있으며, 민간위탁으로 운영하고 2000년 5월 10에 최초 가동되었다. 표1은 밀양-하남 하수처리장의 제원 및 운영현황을 보여주고 있다.

표 1. 기본현황 (밀양-하남 하수처리장, 2007)

구분	내역	구분	유입수(mg/L)		방류수(mg/L)	
			설계수질	운영수질	설계수질	운영수질
처리방법	산화구연법(MBP법)	BOD	140	72.9	15.5	4.4
전담관리인력(명)	3	COD	110	41.1	18	10.2
설계용량(ton/일)	4000	SS	140	49.7	15	6.2
처리량(ton/일)	2179	T-N	30	24.49	7.5	16.07
슬러지발생량(톤/년)	134.7	T-P	3	2.572	2.1	1.413
약품사용량(톤/년)	1000					



a) 모의구간

b) 밀양강 합류점

c) 양산천 합류점

그림 1. 위성사진

3.2 유소망 구성 및 경계조건

유속장 모의를 위해 흐름모형인 RMA-2를 사용하였으며, 오염물질의 유입시 수질에 미치는 영향은 갈수기에 더욱 클 것이라고 판단되어 상·하류단 경계조건은 각각 갈수량과 갈수위를 사용하였으며, 이 자료들은 하천정비기본계획 보고서를 참고하였다. 낙동강의 갈수기시 유량은 $44.3 \text{ m}^3/\text{sec}$, 수위는 0.836 m로 낙동강 하천정비기본계획-보완Ⅱ(1992)을 참고하였다. 같은 시기의 밀양강 유량은 $3.4 \text{ m}^3/\text{sec}$, 양산천 유량은 $0.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로써 밀양강, 양산천 하천정비기본계획-보완(1992)을 참고하였다. Manning 조도계수는 0.023을 사용하였고, 와점성계수는 RMA-2의 권장값을 참고하여 30000으로 설정하고 Eddy viscosity control을 수행하였다. 계산 시간간격은 0.5 hr로 하여 비정상상태 모의를 수행하였다. 유속장 모의에 사용된 절점개수는 26,699개, 요소개수는 8666개로 구성하였고, 자연 하도의 특성상 하폭의 확대 및 축소, 단면의 불규칙성등을 보다 적절히 모의하고자 삼각망과 사각망의 혼합 요소망으로 구성하였다. 지류합류부는 낙동강 본류 및 밀양강, 양산천에 비해 그 유량이 매우 작아 모의에 미치는 영향이 미미하다고 판단되어 본 연구에서는 생략하였다.

표 2. 유역 유황 (m^3/sec)

하천명	갈수량	저수량	평수량	홍수량	비고
낙동강	44.3	91.2	167.6	358.4	진동수위표
밀양강	3.4	6.9	12.7	27.1	
양산천	0.7	1.4	2.6	5.5	

표 3. 경계조건

입력지점	유량(m^3/sec)	농도(mg/L)
낙동강본류	44.3	3.07
밀양-하남 하수처리장	0.03	4.40
밀양강	3.4	1.76
양산천	0.7	3.91

3.3 기준 농도자료

본 연구에 사용된 농도 실측자료는 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/weis/>)의 2000년에서 2006년까지 갈수기에 해당하는 2월 평균 BOD를 사용하였다.

표 4. 지점별 BOD 측정값(mg/L)

지점명	거리* (km)	측정년도							평균
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
삼랑진	14.1	2.9	2.7	1.7	1.6	4.3	2.4	4.3	2.84
물금	34.8	4.0	3.1	2.6	2.7	3.7	2.3	4.2	3.23
금곡	39.6	4.3	3.0	1.8	2.4	4.5	3.2	4.1	3.33
구포	42.9	4.4	3.5	2.7	3.3	4.0	3.2	4.3	3.63
하구연1	55.9	5.7	5.1	1.6	5.6	2.9	3.1	3.2	3.89
하구연2	58.4	5.9	4.7	1.7	5.5	3.2	2.6	3.6	3.89

* 시점으로부터의 거리

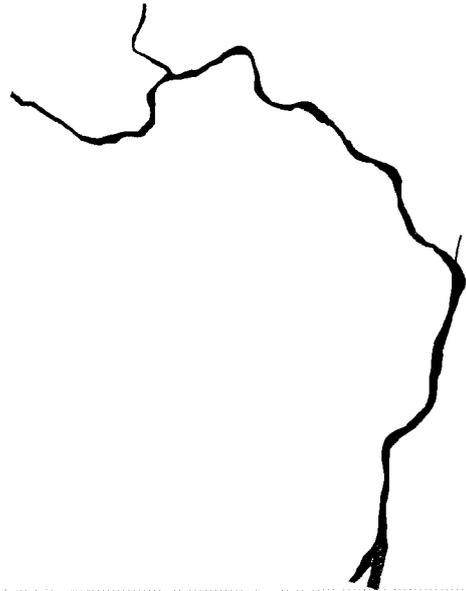


그림 2. 유한요소망

3.4 모의조건 및 매개변수 추정

관측값을 가장 적절히 모의하는 조건을 찾기 위해 종분산계수, 횡분산계수 그리고 Decay값의 변화를 주어서 각각 모의하였다. 관측값을 가장 적절히 나타내는 조건으로, 두 모형 다 종분산계수는 10, 횡분산계수는 1을 나타내었고, 이 조건에서 Decay 0.01(/day)일때 기준 지점들에 대한 값에 근접하였다.

표 5. Decay 변화에 따른 지점별 모의 결과 비교

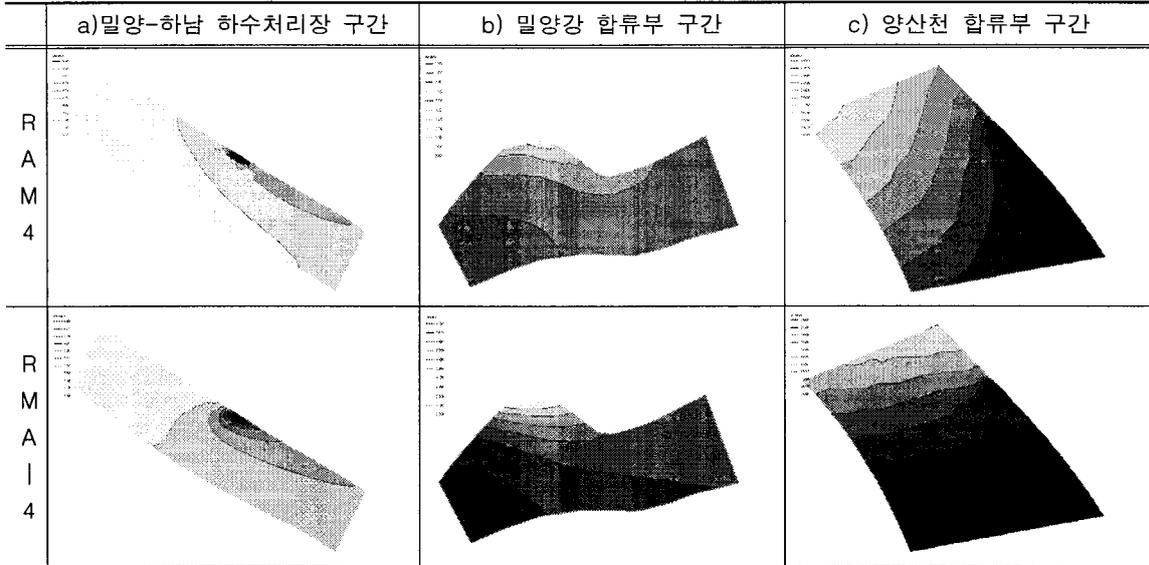
지점명	관측값	RAM4 (mg/L)					RMA-4(mg/L)				
		-0.01	-0.005	0	0.005	0.01	-0.01	-0.005	0	0.005	0.01
삼랑진	2.84	2.95	3.00	3.05	3.10	3.15	2.97	3.02	3.07	3.12	3.18
물금	3.22	2.64	2.84	3.06	3.29	3.54	2.67	2.87	3.08	3.31	3.56
금곡	3.32	2.58	2.82	3.08	3.36	3.67	2.61	2.84	3.09	3.37	3.67
구포	3.62	2.50	2.77	3.07	3.41	3.79	2.52	2.79	3.09	3.43	3.80
하구연1	3.88	2.00	2.35	2.75	3.23	3.80	2.22	2.61	3.07	3.60	4.23
하구연2	3.38	1.80	2.13	2.52	2.99	3.54	2.04	2.43	2.90	3.46	4.12

4. 모의결과

전체적인 모의구간이 길기 때문에 2차원적인 거동이 일어나는 구간을 따로 설정하여, 밀양-하남 하수처리장의 구간, 밀양강 합류부 구간 그리고 양산천 합류부 구간으로 나누어 각 모형의 2차원적인 오염분포거동을 살펴보았다. 구간 사이는 만곡, 단면 축소 및 확대 등 여러 지형적 변화가 있으나 구간거리가 길어 횡확산이 이미 이루어 졌기 때문에 1차원적인 거동을 한다고 볼 수 있어 생략하였다.

밀양-하남 하수처리장 구간에서는 점오염원의 유입시 분포양상의 차이를 확인 할 수 있는데, RMA-4에서는 분포양상이 횡방향으로 넓게 퍼져있는 반면, RAM4는 흐름방향으로 분포하는 것을 볼 수 있다. 밀양강 합류부 구간에서는 등고선의 분포양상을 보았을 때, RMA-4보다 RAM4가 혼합이 활발히 이루어지는 것을 확인 할 수 있었다. 양산천 합류부 구간에서 RMA-4는 농도가 횡적으로 분포하는 양상을 보이는 반면, RAM4는 흐름방향의 농도분포를 보여주고 있다.

표 6. 각 구간별 상대 농도 분포양상



5. 결론 및 향후과제

각 구간별 농도분포를 비교했을 때 RMA-4는 수평 및 수직방향으로 농도가 확산되는 경향을 띠는 반면, RAM4는 흐름방향으로 농도가 확산되는 것을 보여주고 있다. 이것으로 RAM4가 RMA-4보다 하천의 물리적 현상을 좀 더 정확하게 재현함을 확인 할 수 있었다.

본 연구의 결과를 바탕으로 향후 낙동강주변에서의 순간적인 오염원의 주입과 같은 각종 오염 사고에 대비하여 취수장의 운영방안 등을 제시 할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제명:RAMS 개발)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1991). 낙동강 하천정비기본계획-보완(하구둑-밀양강합류부).
2. 건설교통부(1992). 밀양강, 양산천 하천정비기본계획-보완.
3. 건설교통부(2004). 낙동강 유역종합 치수계획 보고서.
4. 과학기술부(2007). 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업-RAMS 개발 2단계 최종보고서.
5. 밀양-하남 하수처리장(2006). 밀양-하남 하수처리장 운영일지.
6. 송창근(2006). 수평2차원 유한요소모형을 이용한 비보존성 오염물질의 확산거동 해석, 석사학위논문, 서울대학교.
7. 오정선(2004). 사행하천에서 오염물질의 2차원 거동특성 해석, 한국수자원학회논문집, 제37권 12호, 979 ~ 991.
8. 최남정(2007). 2차원 수치모형을 이용한 팔당호의 수질예측, 석사학위논문, 서울대학교.