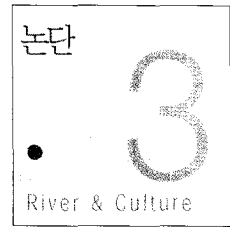


1. 서론

우리나라에 매년 내리는 강수량은 평균 1,159.2mm이다. 이 양은 세계 평균 강수량인 730mm에 비해서 약 60%나 많지만 인구 1인당 차지하는 물은 1년에 3,100m³로서 세계평균의 1/10밖에 되지 않는다. 연평균 수자원 총량 1,267억m³ 중 45%에 해당되는 570억m³가 증발, 침투 등에 의하여 손실되며 나머지 55%인 697억m³가 하천을 통하여 유출된다. 하천 유출량 697억m³ 중 67%에 해당되는 467억m³는 홍수 시 유출로 바다에 흘러가 버리고 평상시 유출량인 33%의 230억m³만을 가용수량으로 볼 수 있다. 570억m³에 포함된 지하수 22억m³를 합하면 총 가용 하천수량은 252억m³가 된다. 이는 총부존량 1,267억m³의 18%에 불과하므로 수자원의 효율적

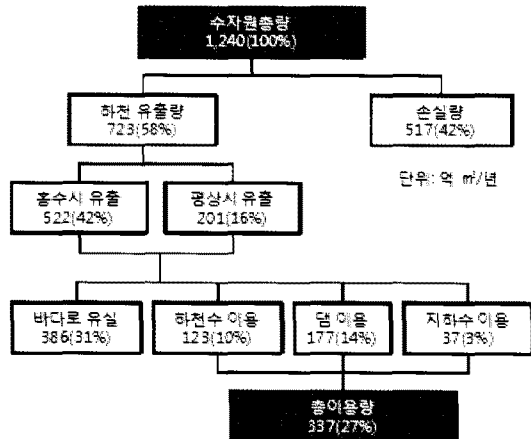


서 일 원 | 서울대학교
건설환경공학부 교수
(seoilwon@snu.ac.kr)

RAMS(2-3-3) 개발

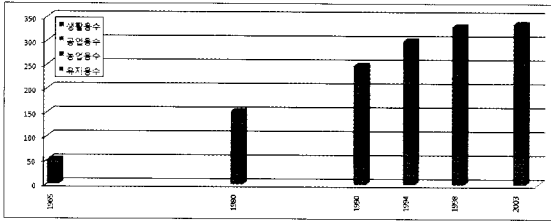
인 이용은 많은 문제를 안고 있음을 알 수 있다. 물이용량은 1965년 51억m³에서 2003년 337억m³으로 약 30년 동안 6배 이상 증가(인구는 2,870만 명에서 4,780만 명으로 1.7배 증가)하였다. 인구증가 및 경제성장 등 수요의 증가와 함께 댐 및 광역상수도 건설 등 용수공급시설의 확충이 그 원인으로 판단된다. 하지만 90년대 후반 이후 물수요 관리 강화, 인구 및 경제성장 둔화 등의 영향으로 물이용 증가추세가 크게 둔화되고 있다(물이용량 : '90년, 249억m³→'94년, 301억m³→'98년, 331억m³→'03년, 337억m³).

우리나라는 연강수량의 2/3 정도가 6~8월에 편중되어 내리기 때문에 대부분이 홍수로 흘러내려 가고 실제로 이용가능한 평상시 유출은 총 수자원량의 23%에 불과하다. 전문가들에 의해서 추정된 지하수 부존량은 2,320억m³ 정도이지만 대수층(帶水層)이 얇고 경제성이 희박하므로 개발이 곤란하다. 하지만 이와 같이 부족한 수자원 중에서도 하천은 인간생활의 원천이라고 할 수 있다. 인간의 생존에 필요한 식수뿐 아니라 곡식을 재배하는 데도 하천의 물이 필요



(그림 1) 우리나라 수자원 이용현황

하다. 현대에 들어서는 이 이외에 산업용수, 생활용수 등 물에 대한 중요성이 더욱 두각 되고 있다. 이에 교육과학기술부와 국토해양부를 주체로 하는 수자원의 지속적인 확보기술개발 사업단(2001~2011)이 구성되었으며, 지표수의 효율적인 이용을 위한 기술개발의 일환을 하천해석소프트웨어인 RAMS 개발팀이 구성되었다.



| 항목 \ 연도 | 1965 | 1980 | 1990 | 1994 | 1998 | 2003 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 수자원총량 | 1,100 | 1,140 | 1,267 | 1,267 | 1,276 | 1,240 |
| 총이용량 | 51.2 | 153 | 249 | 301 | 331 | 337 |
| 유지용수 | - | 25 | 36 | 64 | 71 | 75 |
| 농업용수 | 44.8 | 102 | 147 | 149 | 158 | 160 |
| 공업용수 | 4.1 | 7 | 24 | 26 | 29 | 26 |
| 생활용수 | 2.3 | 19 | 42 | 62 | 73 | 76 |

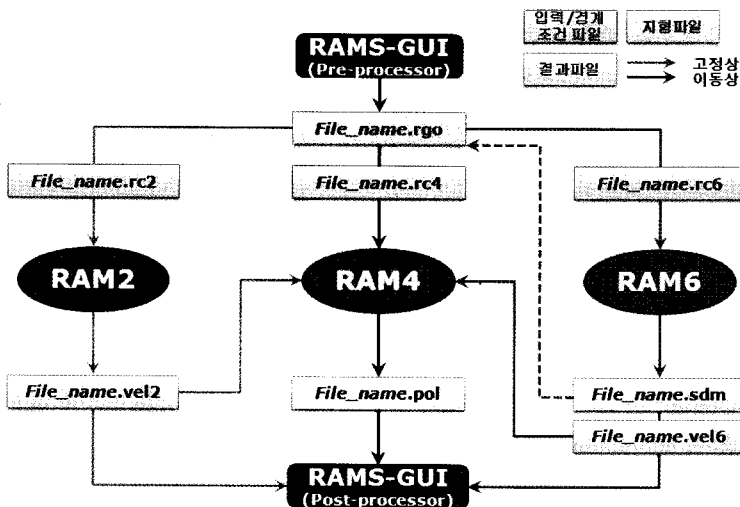
〈그림 2〉 국내 수자원 이용현황

2. RAMS (River Analysis Modeling System)의 개발

수자원의 지속적 확보기술개발사업은 지속가능한 수자원 확보기술을 집중 개발하여 심화되고 있는 물 부족 문제를 해결함으로써 수자원 공급의 안정화를 유도하여, 낙후되어있는 수자원 기술 수준을 선진국 수준으로 향상시키고 국민 삶의 질을 높이는데 그 목적이 있다. 향후 10년간 1,475억 원(정부 1,075, 민간 400)이 투자되며, 지속가능한 수자원 확보기술

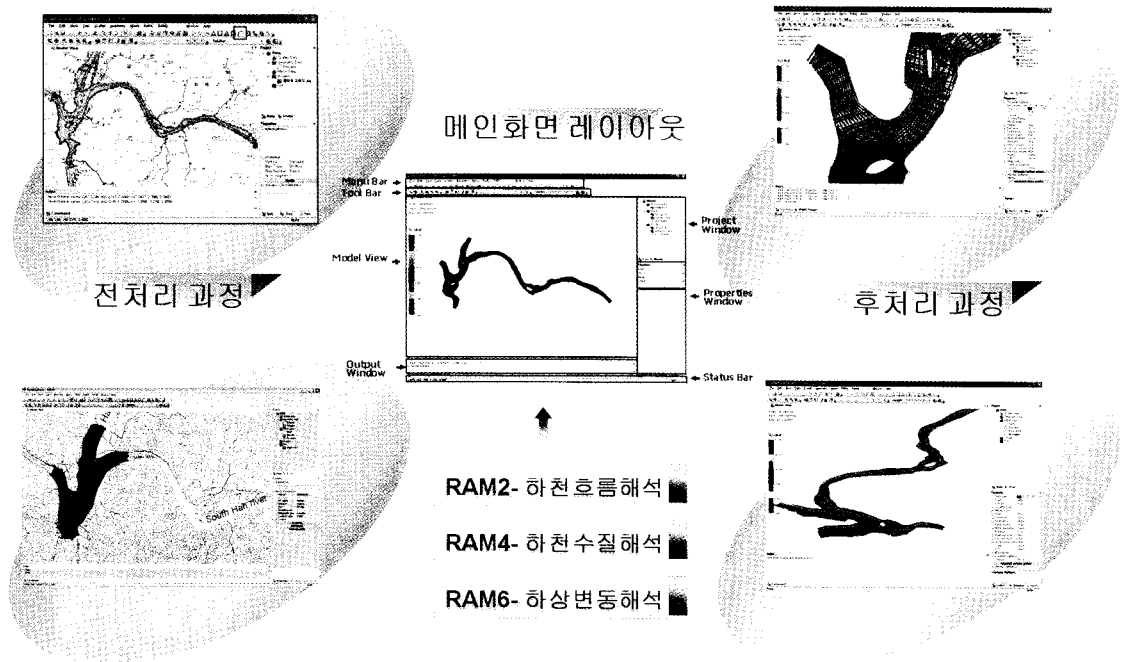
에 대한 개발과 실용화 및 상용화를 추진하여 2011년에는 수자원 배분과 통합관리 시스템의 구축을 완료, 연간 30억㎡의 수자원을 확보한다는 것이다. 교육과학기술부와 국토해양부의 지원 아래, 2001년 처음 착수된 본 사업은 크게 통합수자원 관리기술, 지표수 및 지하수 확보기술, 그리고 대체 수자원 확보기술 등으로 나뉘어 있으며 한국건설기술연구원의 김승 박사를 단장으로 국내 수자원 학계는 물론, 다양한 분야의 연구 인력을 투입한 상태이다. 이 중 RAMS 개발팀은 지표수 확보기술개발사업에 속해 있다.

복잡한 지형 구조를 갖는 자연 하천에서의 동역학적인 흐름환경을 효과적으로 해석할 수 있는 하천흐름해석모형(RAM2), 하천에 유입된 오염물질의 이송-확산 과정을 해석하는 오염확산해석모형(RAM4), 토사 이송 및 하천의 하상변동을 해석할 수 있는 하상변동해석모형(RAM6) 및 세계의 모형에 전·후처리 기능을 제공하는 GUI시스템의 연계를 통하여, 하천의 역학적 특성을 해석하고 예측할 수 있는 효율적이고 유기적인 유한요소모형 RAMS를 개발하였다. 본 3단계 연구에서는 RAMS의 상용 소프트웨어 출시 단계로서 베타버전 출시를 마친 지난 연구기간 동안의 다양한 연구성과와 적용결과, 그리고 사용자 설문조사 내용 등을 바탕으로 모형 간 연동 범위 및 GUI기능 구현 범위 등을 협의하고 베타버전 출시를 위한 실질적인 업무를 추진하고 있다.



〈그림 3〉 RAMS의 구조도(서일원 외, 2007)

RAMS는 2006년 8월 초기 시험버전인 알파버전이 완성되어 서울대, 연세대, 경북대, 인제대, 창원대 등에서 하천 현장에 적용하여 검증을 수행하였으며, 2006년 11월에는 베타버전을 완성하여 학계, 연구소 및 엔지니어링 업체 등의 유관기관에 배포하여 공식적인 테스트를 수행 중에 있다. 또한 2008년 영문베타버전을 출시하여 미국, 영국, 일본, 중국에서 참석한 교수 및 학생들을 대상으로 출시회를 개최하였



〈그림 4〉 RAMS 소프트웨어의 계산과정

고, 이후 다양한 전시회 등에 참가하여 진보된 기술성과를 홍보하고 있다.

RAMS의 개발은 계산 엔진 코드 개발을 담당하는 대학 연구팀과 GUI 개발을 담당하는 소프트웨어 개발 업체가 함께 진행 중이다. RAMS의 각 계산 모듈과 GUI간의 연동 구조는 〈그림 3〉과 같다. 경북대, 서울대, 연세대 각 연구팀이 RAM2, RAM4, RAM6 계산 엔진 각각의 개발을 담당하며, 소프트웨어 개발 업체인 (주)웹솔루스에서 계산 엔진을 통합하는 GUI를 개발하였다.

RAMS는 중·단기 하천 수리해석이 가능한 2차원 수치 모형으로서 수리학적 지배방정식을 바탕으로 하며, GUI를 통하여 복잡한 하천에서의 평면적 거동 분석이 가능하다. RAMS는 하폭에 비해 수심이 얇은 하천 해석에 적합한 수심적분 형태 지배방정식을 사용하기 때문에 수심이 깊은 호소나 해안에 대해서는 적용이 어렵다. 그러나 수리학적으로 비교적 하천과 비슷한 거동을 띄는 하천형 호소나 하구 및 연안까지는 모형의 확장 적용이 가능하다. 복잡한 하도 지형 구현이 가능한 RAMS는 교량 세굴과 같은 하천 구조물 주

변의 국부적인 수리학적 거동을 모의하는데 편리하며, 비교적 하폭이 좁은 하천 지류로부터 본류에의 합류지점, 그리고 나아가 본류 전체에 대한 모의가 가능하며, 따라서 2차원적 특성을 지니는 하천 및 지표수 영역을 모의대상으로 광범위하게 포함하고 있다. RAMS의 모형 적용 범위는 〈표 1〉과 같이 정리할 수 있다.

〈표 1〉 RAMS의 연구개발 범위(서일원 외, 2007)

| 공간적 차원 | 시간적 | 적용 대상 영역 | 하도 적용범위 |
|--------|-------------|----------|------------------------------|
| 1차원 | 단기 (시-일 단위) | 호소 | 하천 여울 및 웅덩이, 구조물 주변 등의 국부 해석 |
| | | 하천형 호소 | |
| 2차원 | 중기 (일-월 단위) | 하천 | 하천 지류 및 본류와의 합류부 |
| | | 하구 및 연안 | 지류를 포함한 하천 본류 전체 |
| 3차원 | 장기 (월-연 단위) | 해안 | 대상 하천을 포함하는 유역 |

하천흐름해석시스템(RAM2) 개발에서는 SU/PG 기법을 이용한 2차원 수치 모형으로 수심 평균 흐름 방정식을 지배

방정식으로 하여 수치화하여 상향 가중함수의 처리방법을 유도하고 도입하였다. 또한 2단계 연구에서는 난류해석 및 경계해석에 대한 SU/PG 유한요소모형의 확장, 자연하천지형을 반영한 유한요소망의 범용화 기법 개발, 유한요소모형 검보정기법의 개발 및 매뉴얼 개발 등을 수행하였다. RAM2는 전산수리학 분야의 난제로 남아있던 상류, 사류의 천이류 및 급변 부정류 등 복잡한 수리해석의 문제점을 극복하고 더욱 정교한 수치모형 개발을 통해서 하천수리학분야의 신기원을 이룩하였다.

하천수질해석시스템(RAM4) 개발에서는 1단계 연구를 확장하여 반응성 오염물질의 거동 모의 및 다양한 주입 조건에 대하여 모의가 가능한 보다 실제적인 수질 모형 개발에 중점을 두었다. 따라서 사용된 지배방정식에는 반응항과 생성·소멸항이 추가되었다. 또한 주입 조건의 경우 실제 오염물의 유입 상황을 잘 반영할 수 있도록 주입 조건을 다양하게 구사하는 입력 조건 및 해석 기능을 추가하였으며, 1단계 모형에서는 고려되지 않았던 반응성 오염물질 모의 기능 개발을 위해 이론적 연구와 모형 개발을 수행하였다. 본 연구에서는 사행수로에서의 흐름구조를 구명하기 위하여 S자형 사행수로에서 수심과 유량 조건을 바꿔가며 다양한 실험을 수행하여 주 흐름과 이차류의 흐름특성이 오염물질 거동에 미치는 영향을 심도 있게 분석하였으며, 오염물의 초기 운동량과 부력이 상대적으로 약한 순간 주입 조건에서 실험을 수행하여 초기혼합 농도에 대한 실험식을 제시하였다. 또한 하천 현장에서의 RAM4의 다양한 검증을 통하여 RAM4의 적용성 및 활용성을 높였다.

하상변동해석시스템(RAM6) 개발에서는 Exner 방정식의 유한요소법 적용 시에 새로운 알고리즘을 개발하여 수치적 불안정성을 개선하였으며, 상류에서 유입되는 유사량에 의한 하상변동이 가능하도록 유사유입 경계조건에 대한 알고리즘을 개발하였다. 또한 혼합유사로 구성된 하상에서의 유사량 산정 알고리즘을 조사하고, 개발된 모형을 만곡수로 흐름에 적용하여 그 성능을 평가하는 한편 실제 자연 하천에 적용시킴으로써 개발된 모형의 실효성을 검증하였다.

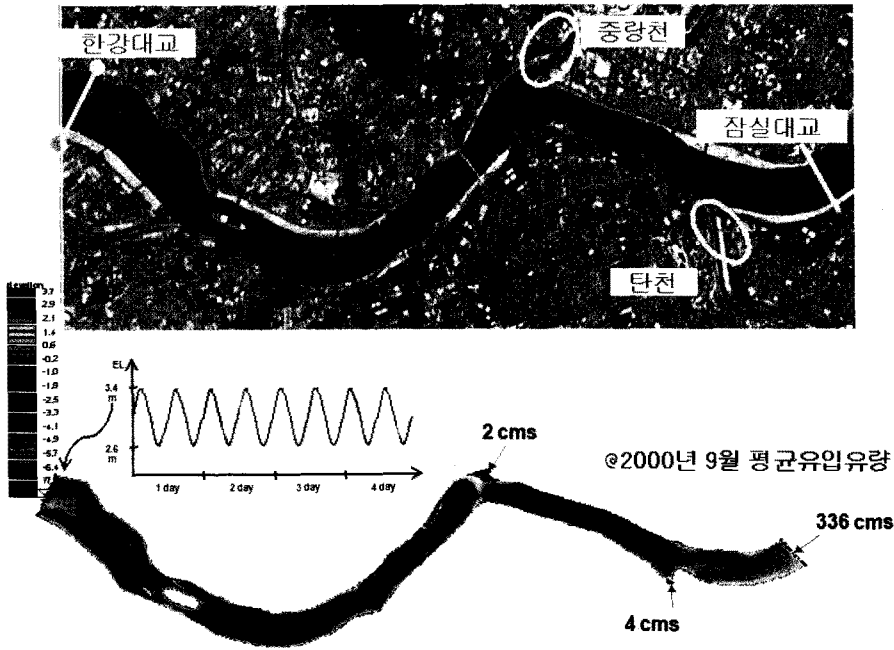
또한 2단계 연구에서는 1단계 과업에서부터 지속적으로 개발된 계산엔진(RAM2/ RAM4/ RAM6)들을 범용 2차원 하천흐름/수질/하상변동 GUI 모형으로 개발하였고, 이를 상용화할 수 있도록 프로그램을 보완·검증하여 국내 베타 버전을 발표하였다. 이를 위해 2차원 유한요소를 생성할 수 있는 범용 2D mesh generator를 개발하고, 해석모형의 입력자료 생성 모듈 해석모형의 입력 데이터를 처리할 수 있는 Pre-processor 개발 및 후처리 GUI 설계를 수행하였다.

3. RAMS의 적용

본 연구의 연구진들은 다양한 수리조건(수위, 유량 등) 및 지형적 특색(만곡, 합류부 등의 지형자료)을 고려하여 계속적인 모형의 검증을 수행해왔다. 실험수로를 이용한 기초적 검증은 물론, 나아가 4대강 유역의 다양한 지형조건을 이용하여 검증해보았다. RAMS 개발연구진은 RAMS를 한강에 적용한 결과 탄천과 중랑천에서 오염물질이 한강으로 들어올 경우 탄천에서 유입된 오염물질의 농도변화는 진행이 빠른 반면, 중랑천에서 유입된 오염물질은 농도변화가 느리게 진행돼 약 4일이 지난 후 노들섬 부근을 지났다고 설명했다. 이에 대한 내용은 다음과 같으며 이는 RAMS 소프트웨어를 적용하게 되는 일반적인 순서가 될 수 있다.

RAMS 소프트웨어의 검증을 위한 모의대상구간은 잠실 수중보 하류로부터 한강대교 상류까지로 선정하였다. 특히 이 구간에는 암사취수장과 구의 취수장이 위치해 있고, 한강 지류 인 중랑천, 탄천, 그리고 왕숙천의 유입이 이뤄지고 있으며 평균 유입유량은 <그림 5>에 나타난 바와 같다.

RAMS 소프트웨어의 GUI 상에서는 <표 2>에 나타나 있는 시나리오의 경계조건을 설정하기가 매우 용이하며 이를 입력하여 각각의 시나리오를 모의할 수 있다. 특히 각 취수장 및 지류에서의 유입 농도와 지속시간 등을 고려한 경계조건 설정이 간편하여 이를 위한 개별적인 전처리 과정이 없이 경계조건을 설정할 수 있는 장점을 갖고 있다.



(그림 5) 잠실 수중보 하류부터 한강대교까지의 모의 대상구간

(표 2) 취수장 유입수의 최대농도

| 시나리오(유입유량) | 입사 취수장 | 구의 취수장 |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| 2-2 (200 CMS) | 15.56 ppm (12 hr) | 19.65 ppm (22 hr) |
| 2-4 (1,000 CMS) | 4.07 ppm (8 hr) | 7.80 ppm (13 hr) |

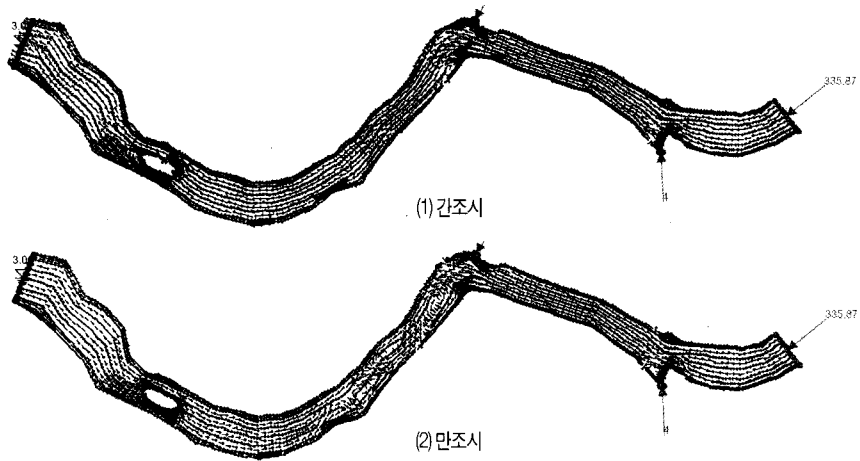
하류부의 수위조건 및 경계조건은 2000년 10월에 측정된 자료를 이용하였으며, 한강 하류부인 서해에서의 시간의 변화에 따른 조류의 영향이 나타나는 수위차를 반영하였다.

하류부에서 발생하는 수위변동으로 인한 조류는 주흐름장을 더욱 복잡하게 만들게 되며 이 지역에서의 오염물질 거동에도 직접적인 영향을 미치게 된다. <그림 6>은 한강 하류부의 간조 및 만조 시에 발생하는 유속분포를 계산한 결과이다. <그림 6-1>에서 보는 바와 같이 밀물과 썰물발생 시기의 중간단계인 간조 시에는 전체유역에 걸쳐서 정상상태의 흐름처럼 나타나게 된다. 밀물과 썰물시기의 흐름장을 비교해보면, 하류경계부에서 발생하는 감조구간으로 인하여 하류부의 유속이 매우 높은 것을 확인할 수 있고, 이 시기에 발생하는 재순환 공간의 크기는 만조 시보다 매우 큰 것

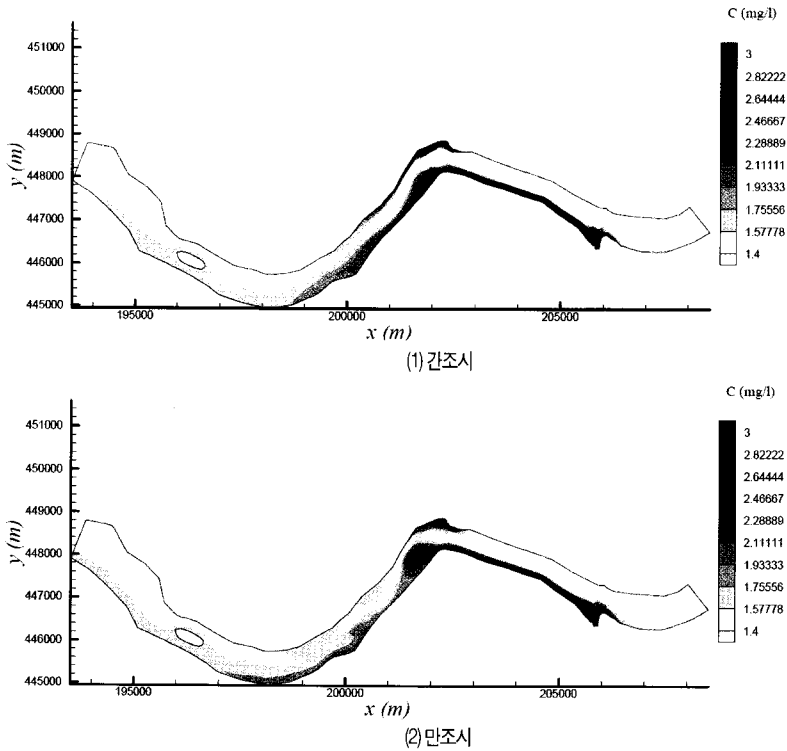
을 알 수 있다.

<그림 6-2>에 따르면, 하류경계부의 수위가 썰물시기로부터 점점 증가하게 되면 첫 번째와 두 번째 만곡구간에서 매우 큰 재순환 공간이 발생하게 된다. 또한 이 시기에는 조류의 영향이 하류경계부에서부터 상류방향으로 중랑천 합류부까지 도달하는 것을 확인하였다.

간조 시와 만조 시의 2차원 농도분포를 각각 비교하여 등농도선을 <그림 7>에 표기하였다. 이 그림들을 통해서 탄천 유역으로부터 유입되는 높은 농도의 BOD 값이 하류 경계부까지 전달되며 그리하여 노들섬의 좌측에 위치하고 있는 노랑진에서의 농도 값은 우측보다 매우 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 탄천으로부터 유입된 오염수는 한강 본류의 좌안을 따라 종방향으로 확산되며 또한 작은 유속이 발생하는 재순환 공간인 첫 번째 만곡부의 하류부에서는 횡방향으로 확산하게 된다. 이러한 흐름의 수평방향재순환현상은 농도분포에 있어서 저장현상을 야기하게 된다. 이 그림들은 또한 중랑천 주변의 오염원은 횡방향으로는 다소 확산이 저조하며, 본류의 우안에 걸쳐서 하류로 이동하게 된



〈그림 6〉 한강 하구의 조류에 의한 유속분포 비교



〈그림 7〉 한강 하구의 조류에 의한 BOD 농도분포 비교

다는 것을 말해주고 있다. 따라서 중랑천으로부터 유입되는 BOD가 높은 유입수는 본류의 BOD 농도변화에 그다지 큰 영향을 주고 있지 못하다. 〈그림 7-1〉에서 볼 때 간조 시 동안에 중랑천에서 유입되는 높은 BOD 유입수는, 탄천에서 유입되는 높은 BOD 유입수가 종횡방향에 걸쳐서 크게 확산되는 반면에 본류 확산에 큰 영향을 미치지 못한 채로 우측

제방에 걸쳐서 퍼져나가는 것을 알 수 있다. 〈그림 7-1〉을 보면, 만조 시에는 역류와 매우 큰 재순환 현상이 오염수의 거동에 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있으며 역류로 인하여 오염원은 후퇴하게 된다. 또한 재순환 흐름은 이 구간에 큰 횡혼합을 야기한다.

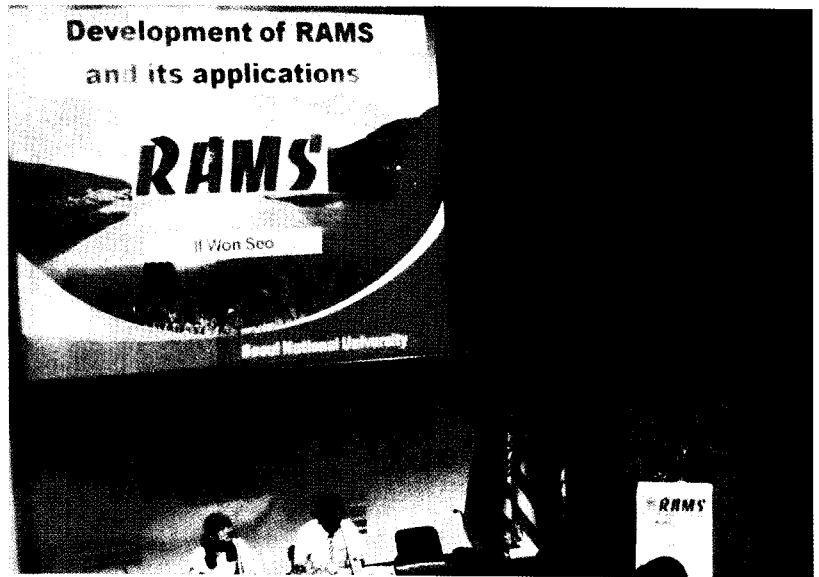
4. 맺음말

한국과학재단은 2007년 과학기술부 연구개발사업 우수 연구성과 50선에 수자원 확보 사업의 2차원 하천해석상용모형(RAMS) 개발(2-3-3 과제 연구책임자: 서울대학교 서일원 교수) 과제를 선정하였다. 지식확장 및 학술발전 부문의 에너지환경분야에서 우수 연구성과로 선정된 2차원 하천해석 상용모형(RAMS) 개발은 국내 자체기술로 개발한 RAMS 소프트웨어로 수자원의 지속적 확보와 수생태계 개선에 이바지할 것이라는 사유로 선정되었다. 본 연구는 국내 여건에 적합한 국내 자체 기술에 의한 상용 소프트웨어 개발이라는 데 그 의의가 있다. 연구팀은 개발된 모형의 상용화를 완료하여 최종 완성된 모형을 각종 검증과정을 거쳐 국내 외에 상용 소프트웨어로 출시할 예정이다. RAMS 베타버전 1.0은 이미 출시되어 국내 업계 및 학계, 연구기관에 배포되어 있는 상태이다.

또한 2008년 7월초에 스페인에서 열린 '2008 사라고사 엑스포'에 참가한 필자는 학술행사인 '워터 트리뷰트'에 초청돼 RAMS를 발표했고 참석자들에게 뜨거운 호응을 얻었다. 스페인 지역 방송국은 인터뷰를 요청해 RAMS의 장점과 활용방법을 짚어가기도 했다. 2009년 대한토목학회 학술발표회의 특별 초청 전시회인 'Civil Expo'에서는 RAMS의 적용성과 개발과정, 그리고 수질예보시스템으로서의 발전 가능성을 제안하였다.

그리고 2차원 하천해석수치 모형의 수요가 최근 들어 급증하고 있어 완성본이 출시되면 대학, 연구소, 정부기관, 엔지니어링 업체 등 500여 기관에서 구입할 것으로 예상된다.

현재 RAMS 개발연구팀은 2차원 하천해석 모형인 RAMS 베타버전의 보완 및 검증 작업을 수행 중에 있으며 용이한 피드백을 위해 홈페이지(www.rams.or.kr)를 개설하여 운영하고 있다.



(1) 사라고사 EXPO - RAMS show(터키 이스탄불, 2008)



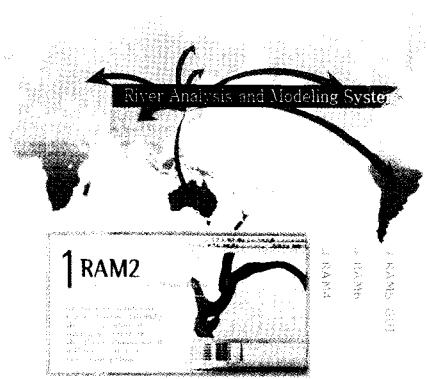
(2) Civil Expo(대전 컨벤션센터, 2008)

(그림 8) RAMS 소프트웨어의 홍보활동

- Notice & News
- RAMS River Analysis and Modeling - 2006.07.01
- RAMS River Analysis and Modeling - 2006.07.01
- RAMS River Analysis and Modeling - 2006.07.01

ANALYSIS MODEL OF RIVER FLOW

- Analysis of the turbulent flow & turbulent effects
- Analysis of the influence of river embankments & hydraulic structures
- Analysis of the pollutant behaviors in a meandering stream
- Analysis of the deposition of various types of sedimentation materials
- Analysis of the sediment transport & bed elevation change
- Dynamic coupling of the analysis of river flows and bed elevation changes
- Mass processor to maximize the convenience of users



(그림 9) RAMS 소프트웨어의 홈페이지 (본 홈페이지를 통해 RAMS 소프트웨어와 예제파일 등을 무료 다운로드 가능)

본 연구가 성공적으로 수행되면 하천 관련 산업뿐만 아니라 수자원, 환경, 건설, 주운교통 산업 등 다양하게 활용될 수 있을 것이다. 그리고 RAMS는 국내 자체기술에 의한 응용 소프트웨어의 개발이라는 측면에서 큰 의미가 있으며 향후 한강뿐 아니라 4대강 유역에서의 오염물질 유입사고 시 하수 처리장과 취수장 운영에 효과적 대비책을 마련하여, 국내 최초의 수질예보시스템 구축이라는 새로운 패러다임을 제시할 수 있을 것으로 확신한다.

참고문헌

- 과학동아 12월호, “컴퓨터에 한강이 들어왔네.”
- 서일원 외(2007, 2), RAMS (River Analysis and Modeling System) 개발, 2단계(1-3차년도) 보고서, 과학기술부, 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업단.

