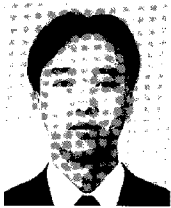


국내 최초의 범용 2차원 하천해석 소프트웨어(RAMS) 개발



김 유 진
(주)웹솔루스 시스템사업부 부장
icepc@websolus.co.kr



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

히 세계화 되어가는 시점에서 우수한 기술은 국가 간의 장벽을 넘어서 전 세계적으로 확장되는 현상을 보이고 있으며, 2차원 수리 해석 프로그램의 경우는 1990년대 초반부터 벌어져온 세계와의 기술력의 격차가 더욱 커져 가고 있는 상황이다.

국내의 대학, 연구소에서는 국내의 하천 상황에 맞는 분석 알고리즘을 개발할 필요성을 느끼지만, 이를 상용화하는 기술이 부재하여, 항상 연구 수준에서 더 이상의 발전을 못하고 있는 현실이다. 일단 범용 2차원 수리 해석 프로그램이 성공적으로 개발이 된 이후에는 추가적인 업그레이드가 용이해진다. 처음 개발단계에서 어려움이 많지만 개발, 유통, 업그레이드의 전 과정을 거친 이후에는 다양한 분야로의 확장이 가능하게 되며, 단순히 2차원 흐름, 수질, 하상변동 뿐만 아니라 1차원 하천 모형이나 수문 모형으로의 확장이 가능하게 된다. 예를 들면 2차원 하천해석 모형이 개발될 경우 이를 바탕으로 홍수범람에 의한 침수구역 예측 시스템 등을 상용화할 수 있는 기반기술을 확보할 수 있다.

이러한 상황에 발맞춰 국내 독자 기술을 통해 하천 흐름, 수질, 하상변동 해석을 수행할 수 있는 국내 최초의 하천해석 상용 소프트웨어인 RAMS (River Analysis Modeling System)가 개발되었다. RAMS는 「수자원의 지속적 확보기술개발 사업」의 일환으로 개발되었으며, 연구책임자인 서울대학교 서일원 교수를 중심으로 산학 협동으로 상

1. 머리말

하천을 효율적으로 관리하고, 홍수 및 이수 상황에 대비하기 위해서는 하천의 수리수문학적 거동을 예측하고 분석할 필요가 있다. 국내의 경우 하천의 흐름, 하상변동, 수질해석을 위해서 외국의 제품을 주로 사용해 오고 있었다. 학술적인 연구 분야에서는 국내의 모델들이 연구되어왔지만 이를 실용화하는 기술적인 측면의 접근이 부족하여, 아직까지는 2차원 흐름, 수질, 하상변동 해석모형의 국산 모델 개발에는 한계가 있었다.

하천의 수리학적 거동을 예측하는 외국 제품을 수입하여 국내 수자원 분야에 적용할 경우에는 국내 기술의 연구 개발에 대한 투자 자체를 불필요하게 만들며, 점점 외국의 기술에 종속되게 된다. 특

용화를 준비하고 있다.

지금까지 국내에는 부분적으로 범용 프로그램의 개발을 위한 노력은 있었으나 상용화를 위한 제반 조건을 만족시키지 못하고, 소수의 전문가들만이 쓸 수 있는 불완전한 범용 모델로만 개발되 왔다. 이러한 가장 근본적인 이유는 해석엔진 개발 및 검증 기술과 범용 GUI 인터페이스의 개발 기술 등이 부재하였기 때문이다.

범용 소프트웨어를 개발하기 위해서는 소프트웨어 개발 프로젝트의 계획 수립단계에서부터 시스템적인 접근이 필요하게 된다. 일반적으로 소프트웨어 개발기술단계는 기초단계, 개발단계, 발전단계, 성숙단계로 나뉜다. 기초단계는 선진국의 기술을 모방하여 개발하거나 소프트웨어의 이식 또는 단순한 한글화 기능을 추가할 수 있는 수준을 말한다. 개발단계는 외국에서 개발된 소프트웨어를 도입하여 부분적으로 기능을 추가하거나 개발할 수 있는 수준으로써 요소기술을 확보하여 개발하는 단계이다. 발전단계는 2개 이상의 요소기술을 복합하여 새로운 시스템으로 업그레이드하거나, 핵심적인 시스템 기술, 기반기술을 확보한 수준을 말한다. 성숙단계는 사용자의 요구에 따라서 경쟁력 있는 소프트웨어를 독자적으로 개발할 수 있는 단계를 말한다.

RAMS 개발 이전까지 국내 기술수준은 기초단계에서 개발단계로 넘어가는 상황이었다. 특히 핵심엔진의 경우는 외국의 기술을 도입하여 우리의 기술로 개발하는 개발단계라 볼 수 있으며, GUI의 기술은 국내의 타 분야에서는 세계적인 수준으로 발전이 되었지만 수자원 분야에서는 기초단계에서 개발단계로 넘어가는 초보적인 수준이었다고 할 수 있다. 그러나 RAMS 개발을 통해 국내 독자기술의 핵심 해석엔진인 RAM2, RAM4, RAM6를 확보하게 되었으며, 국내 수자원 분야에서는 처음으로 2차원 범용 mesh generator를 적용함으로써 개발 기술을 개발 단계에서 발전 단계로 한 단계 끌어올리는 성과를 올릴 수 있었다.

본 글에서는 먼저 RAMS의 해석모형인 RAM2,

RAM4, RAM6와 mesh generator를 포함하는 전후처리 GUI 등 RAMS의 기능 및 구성에 대해 전반적으로 소개하고자 한다. 또한 사용자 설문조사 결과를 바탕으로 향후 RAMS의 상용화 성공 가능성에 대해 살펴보고자 한다.

2. RAMS 구조 및 모델링 프로세스

RAMS는 유한요소 해석모형을 기반으로 한 범용 2차원 하천 수리해석 소프트웨어로써 크게 계산엔진인 해석모형과 사용자 편의를 위한 전후처리 GUI로 구성된다(그림 1). 실제 하천해석을 수행하는 핵심 계산엔진인 해석모형은 복잡한 지형구조를 갖는 자연 하천에서의 동역학적인 흐름환경을 효과적으로 해석할 수 있는 하천흐름 해석모형(RAM2)과 하천에 유입된 오염물질의 이송-확산 과정을 해석하는 수질해석 해석모형(RAM4), 토사이송 및 하천의 하상변동을 해석할 수 있는 하상변동 해석모형(RAM6)을 포함한다(서일원, 2009).

RAMS는 2006년 8월 초기 시험버전인 알파버전이 완성되어 서울대, 연세대, 경북대, 인제대, 창원대 등에서 하천 현장에 적용하여 검증을 수행하였으며, 2006년 11월에는 베타버전(Beta 1.0)을 완성하여 학계, 연구소 및 엔지니어링 업체 등에 배포하였다. 또한 2008년 영문 베타버전을 출시하여 미국, 영국, 일본, 중국에서 참석한 교수 및 학생을 대상으로 출시회를 개최하였고, 이후 다양한 전시회 등에 참가하여 진보된 기술성과를 홍보하고 있다.

RAMS는 그림 1의 구조도에서 보는 바와 같이 3개의 해석모형인 RAM2, RAM4, RAM6와 전후처리 GUI로 구성된다. 개별 해석모형들은 DOS용 실행파일 형태로 제공되며, *.rc2, *.rc.4, *.rc.6로 명명된 입력 파일(run control file)과 *.vel2, *.pol, *.sdm 이라는 확장자를 갖는 출력 파일로 구성된다(표 1). 또한 RAMS-GUI는 전처리기에 포함되어 있는 mesh generator에 의해 모든 모형

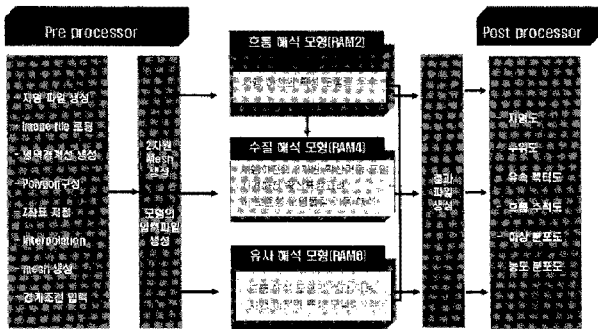


그림 1. RAMS 구조도(서일원, 2007)

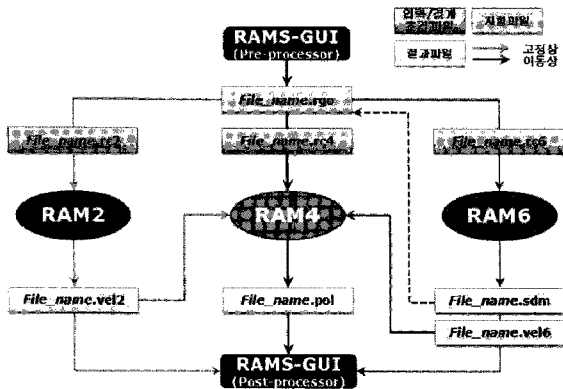


그림 2. RAMS 모델링 프로세스(서일원, 2007)

이 공통적으로 사용하는 지형 데이터 파일(*.rgo)을 생성하고, 전처리 GUI를 통해 입력받은 데이터를 개별 해석모형의 입력 데이터 파일 포맷으로 변환하며, 후처리 GUI를 통해 개별 모형의 해석결과를 표출하게 된다.

RAMS의 모델링 프로세스는 하상변동 해석 수행 여부에 따라 고정상 모의와 이동상 모의로 구분된다. 고정상 모의에서는 하천 흐름해석 모형인 RAM2를 이용하여 하천의 유속과 수위를 계산하고, 모의된 흐름해석 결과는 수질해석 해석모형인

표 1. RAMS 파일 구성

구분	파일명	파일 설명
RAM2	File_name.rc2	흐름해석 모형 입력파일
	File_name.vel2	흐름해석 결과 파일
RAM4	File_name.rc4	수질해석 해석모형 입력파일
	File_name.pol	수질해석 해석 결과 파일
RAM6	File_name.rc6	하상변동 해석모형 입력파일
	File_name.sdm	하상변동 해석 결과 파일
	File_name.vel6	하상변동 해석모형 흐름해석 결과 파일
RAMS-GUI	File_name.rgo	지형 데이터 파일

RAM4의 입력 데이터로 활용된다. 이동상 모의의 경우 흐름해석과 하상변동 해석은 RAM6를 통해 수행되며, 이때 흐름해석과 하상변동 해석은 상호 연계(coupling)되어 진행되고, RAM4는 RAM6의 흐름 해석 결과 파일인 *.vel6를 입력 데이터로 활용한다(그림 2).

3. RAMS 해석모형

RAMS는 중단기 하천 수리해석이 가능한 2차원 수치해석 모형으로서 수리학적 지배방정식을 바탕으로 하며, GUI를 통하여 복잡한 하천에서의 수평적 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 하는 하천형 호소나 하구 및 연안까지는 모형의 확장 적용이 가능하다. 복잡한 하도 지형 구현이 가능한 RAMS는 교량과 같은 하천 구조물 주변의 국부적인 수리학적 거동을 모의하는데 편리하며, 비교적 하폭이 좁은 하천 지류로부터 분류 합류지점, 나아가 분류 전체에 대한 모의가 가능하다(서일원, 2009). RAMS의 모형 적용 대상 영역 및 하도 적용범위는 표 2와 같다.

RAMS의 하천흐름 해석모형인 RAM2는 경북대 한건연 교수팀에서 개발한 2차원 수치모형으로서 최신 해석기법인 SU/PG (Streamline Upwind/Petrov-Galerkin) 기법을 도입하였다. SU/PG 기법은 진행파와 역행파의 진행방향 및 파속을 고려하여 가중함수를 수식화한 방법으로서 상향가중인자는 상류-사류의 천이류 해석을 포함한 다양한 흐름 조건에 대해서 효과적으로 모의되는 것으로 나타났다. RAM2 모형은 상류-사류 및 천이류 계산이 용이함에 따라 생태하천 해석을 위한 여울 및 못에서의 계산이 가능하고, 댐 붕괴류, 제방 붕괴류 등 급격한 흐름의 경우도 안정적으로 해석할 수 있다. 또

표 2. RAMS 모형 적용 범위(서일원, 2007)

공간적 차원	시간적 범위	적용대상 영역	하도적용 범위
1차원	단기(사~일)	호소	하천 영율 및 웅덩이, 구조물 주변 등의 국부 해석
		하천형 호소	
2차원	중기(일~월)	하천	하천 지류 및 본류와의 합류부
		하구 및 연안	지류를 포함한 하천 본류 전체
3차원	장기(월~년)	해안	대상 하천을 포함하는 유역해안

한 RAM2에서는 기존 모형의 경우 과도하게 도입하여 물리적 의미를 상실한 인공점성항 등은 도입하지 않았으며, 요소가중기법 및 이동경계기법 등을 이용하여 마름/젖음(wet&dry)처리를 수행함으로써 보다 안정적인 해석이 가능하다. 그리고 하천흐름에 대한 난류영향을 고려한 지배방정식을 수립하기 위하여 기본적인 Navier-Stokes 방정식을 Reynolds 방정식으로 변환하였으며 난류특성을 반영할 수 있도록 수평방향에 대해서 Smagorinsky 기법을 사용하였고, 연직방향에 대해서는 Mellor-Yamada 기법을 적용하여 지배방정식을 구성하였다(서일원, 2007).

하천 수질해석 모형(RAM4)은 서울대학교 서일원 교수팀에서 개발한 2차원 오염확산 해석모형으로서 오염물질의 거동 모의 및 다양한 주입 조건에 대하여 모의가 가능한 보다 실제적인 모형이라 할 수 있다. RAM4의 경우 지배방정식에 주 흐름방향 변화에 따라 변화하는 분산계수를 사용함으로써 2차원 흐름장이 분산에 미치는 영향(방향성)을 충분히 고려할 수 있으며, 반응항과 생성·소멸항을 추가하여 BOD, DO와 같은 비보존성(반응성) 오염물질도 모의할 수 있도록 하였다. 또한 주입 조건의 경우 실제 오염물의 유입 상황을 잘 반영할 수 있도록 주입 조건을 다양하게 구사하는 입력 조건 및 해석 기능을 추가하였다. 그리고 일정 농도 연속주입을 비롯하여 시간에 따라 변하는 주입, 사고유입 등을 통한 순간 점 주입 조건에서 모의할 수 있으며, 주입 형태의 경우 농도뿐만 아니라 질량으로 유입되는 오염물도 모의 가능하다(서일원, 2007).

하상변동 해석모형(RAM6)은 연세대학교 최성욱 교수팀에 의해 개발 되었으며, 사행하천 등 자연하

천 모의에 적합한 모의결과를 제공하고, 흐름해석 모형과의 연동을 통해서 지형변화에 따른 즉각적인 흐름장 변화를 계산할 수 있다. RAM6는 Exner 방정식을 기본으로 유사량 성분 계산에 있어서 Green의 정리를 이용하여 요소식을 변형시킴으로써 절점에서의 값이 아닌 요소 내부에서의 변수의 공간변화율 계산이 가능하고, 입자의 이송 방향 각도 결정이 용이하다. 그리고 사행하천과 같은 실제 자연하천에 대한 보다 정확한 모의를 위해 유선의 국부 곡률의 공간 변화율을 도입한 관성 조절 방정식을 이용하여 흐름장의 특성을 실제와 더욱 가깝게 나타나도록 하였다. 그 결과 만곡부의 유입부와 유출부에서의 곡률이 하류 방향으로 뒤쳐지는 결과를 보였고, 곡률의 공간변화율을 반영함으로써 유속이 급격하게 변화하는 경우에도 수치적으로 안정된 결과를 얻을 수 있다(서일원, 2007).

4. RAMS-GUI

RAMS-GUI는 크게 전처리 GUI와 후처리 GUI로 구분할 수 있으며, 다시 전처리 GUI는 2차원 유한요소망 생성을 위한 mesh generator와 해석 모형의 입력 GUI 모듈, 입력파일 생성 모듈로 구성되고, 후처리 GUI는 출력파일 생성 모듈과 모의결과 가시화 시스템으로 구성된다.

RAMS-GUI의 실행 화면은 기본적으로 메뉴바와 도구바, 모델뷰, 출력 윈도우, 프로젝트 윈도우, 속성 윈도우, 상태바로 구성되어 있다(그림 3). '프로젝트 윈도우'는 전체적인 RAMS의 메뉴 구조를 한 눈에 알아볼 수 있도록 트리 구조 형태로 설계하

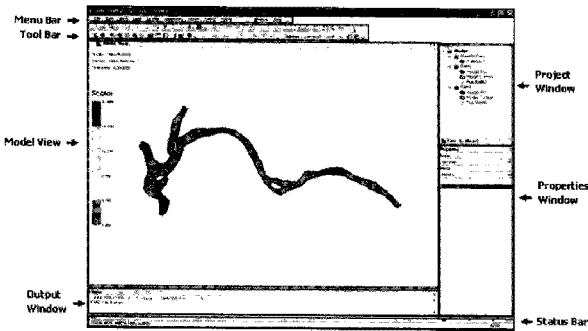


그림 3. RAMS의 기본 GUI

였으며 요소망을 생성하고 모델을 수행하는데 있어 사용자의 편의성을 증대시킨 구조라고 할 수 있다. '속성 윈도우'는 메인 그래픽 화면에서 선택된 개체들에 대한 특성들을 나타내며, 자동 요소망 생성과 관련된 기능을 수행하는 대화상자도 제공한다. '출력 윈도우'에서는 사용자가 현재 하고 있는 작업에 대한 설명이나 모형 실행 시 그 과정에 대한 내용을 출력하도록 하였다(고태진 등, 2007).

4.1 Mesh Generator

Mesh generator는 개별 해석모형이 유한요소 해석(FEM)을 수행할 수 있도록 2차원 요소망(mesh)를 생성하는 역할을 수행하며, 지형 이미지나 DXF 파일을 배경으로 하여 요소망을 생성할 수 있다. 또한 삼각형 노드와 사각형 노드를 지원하며, scatter point를 이용한 요소망 생성, 요소망의 노드를 사용자가 직접 찍는 직접 요소망 생성, 폴리곤을 이용한 요소망 생성을 지원한다. 이밖에 생성한

요소망을 편집하기 위해 형질이 좋지 않은 삼각형 요소들을 자동으로 선택하여 제거하는 기능, 선택된 여러 요소를 한 번에 제거하는 기능, 삼각형 요소에 대해서 선택된 edge를 공유하는 두 요소를 찾아 edge를 변환하는 swap 기능, 하나의 사각형 요소를 두 개의 삼각형 요소로 나누거나 또는 두 개의 삼각형 요소를 하나의 사각형 요소로 병합하는 split/merge 기능, 1차(linear) 및 2차(quadratic) 요소들 간의 자동 변환 등을 지원한다. 특히 사용자가 잘못 생성한 요소들을 바로 이전 상태로 환원하는 undo/redo 기능을 구현하여 능률적인 mesh 생성이 가능하다. 유한요소 해석을 위한 mesh renumbering 기능도 구현하였다. 그림 4는 이미 지 파일을 배경으로 한 2차원 요소망 생성 및 요소망 편집에 대한 GUI 화면을 나타낸 것이다.

4.2 해석모형 입력 GUI 모듈

해석 모형의 입력 GUI 모듈에는 각 해석 모형(흐름, 수질, 유사이동)에 특화된 GUI를 설계하여 사용자는 보다 친숙한 환경에서 편리하게 자료를 입력할 수 있다. RAMS에서의 모의 수행은 Mesh Data에서 변환한 지형 자료(*.rgo)와 실행 제어 자료(*.rc2, *.rc4, *.rc6)를 사용한다. 지형 자료는 RAM2를 실행하는 순간 binary 파일로 생성되며 실행 제어 자료 또한 GUI를 이용한 사용자 입력에 의해 binary 파일로 생성된다. 지형 자료 파일과

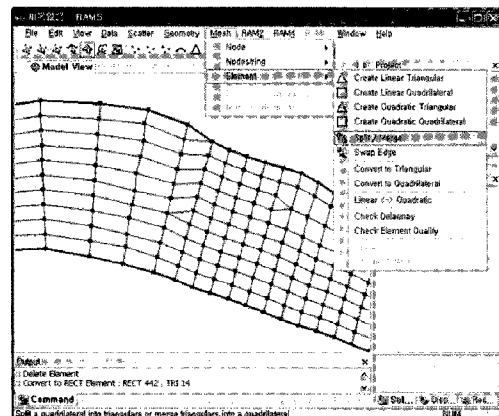
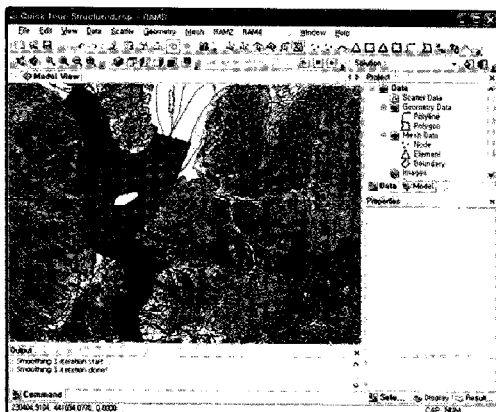


그림 4. RAMS Mesh Generator GUI

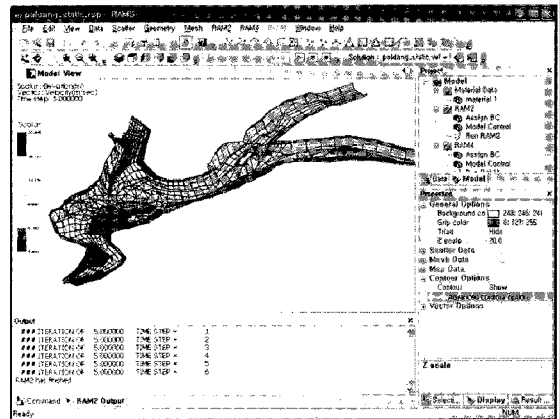
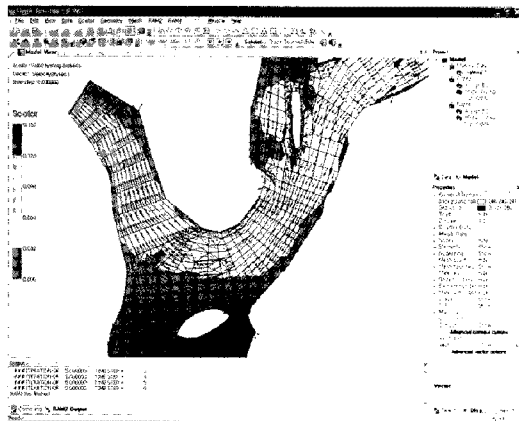


그림 5. RAMS 후처리 GUI

실행 제어 파일은 ASCII 파일로 변환하여 사용자가 입력한 데이터를 확인할 수 있도록 하였다.

4.3 모의결과 가시화 시스템

모의 결과의 가시화 시스템은 RAMS의 후처리 GUI로서 RAMS 해석모형 수행을 통해 산정된 수많은 모의 결과를 체계화하여 등고선 및 화살표 등으로 표현하며, time step 별 결과를 바로 확인할 수 있도록 도와준다. 일반적인 줌인, 줌아웃, 이동, 회전 기능 외에도 Contour Plot, Vector Plot 등의 기능을 지원하고, 사용자의 이해를 돕기 위해 입체적인 시각효과를 가지는 3D View 기능과 부정류의 해석 결과를 시간의 변화에 따라 시각적으로 표현할 수 있는 애니메이션 기능도 가능하다. 애니메이션 기능을 통하여 사용자는 원하는 구간의 time step에서의 모의 결과를 연속적으로 볼 수 있으며, 이 애니메이션을 AVI 파일로 변환하여 다른 동영상 프로그램에서도 재생할 수 있다(그림 5).

5. RAMS 성공 가능성 및 전망

국내 최초의 범용 2차원 하천해석 소프트웨어인 RAMS는 2006년 베타버전 발표 이후 상용화를 전제로 개발 중에 있으며, 2010년 초 상용 버전을 출시할 예정이다. 이에 따라 RAMS의 성공적인 상용

화를 위해 「수자원의 지속적 확보기술개발 사업단」의 지원을 받아 전문 컨설팅 업체를 통해 사용자 설문조사를 수행하였으며, 설문조사 결과를 바탕으로 RAMS 상용화 성공 가능성에 대해 조심스럽게 전망해 보고자 한다.

설문조사는 2008년 기업, 대학, 출연(연) 등 총 251개 기관을 대상으로 전화, 우편, 팩스, 전자메일 등을 이용하여 설문지를 발송하였으며, 이 가운데 99명이 설문에 응하였다(응답률 : 39.4%). 응답자 중 75%는 국산 소프트웨어를 사용할 의향이 있음을 나타내었는데, 이 중 기업의 61%, 대학의 94%, 출연(연)의 71%가 국산 소프트웨어를 사용할 의향이 있는 것으로 조사되었다. 수자원 분야의 경우 지금까지 상용 버전의 소프트웨어 개발은 한 번도 시도되지 않았음에도 불구하고, 대상자의 2/3 가량이 구매의사를 밝힌 것은 RAMS를 상용화 하는데 있어 고무적인 일이라 할 수 있으며, 국내 시장에 어느 정도의 잠재 고객이 존재함을 의미한다고 볼 수 있다. 특히, 대학의 경우 94%가 사용의향이 있다고 조사됨에 따라 RAMS의 마케팅 우선순위를 선정하는데 있어 고려해야 할 것으로 판단된다.

상용 소프트웨어로 개발되어야 할 해석모형의 선호도 조사에서는 수문해석 모형(강우-유출 모형)이 57%, 수리해석 모형(하천흐름 해석 모형)이 32%, 수질해석 모형이 8%, 기타 모형 3% 순으로 나타났다. 단일 모형으로는 강우-유출 모형이 가장 많은 것으로 나타났으나 RAMS와 같은 하천 흐름해석

및 수질해석 모형에 대한 개발 선호도 역시 40%로 일정 부분의 수요가 존재함을 알 수 있다.

S/W 구매 결정 요인에 대한 조사에서는 응답자 중 69%가 제품 구매결정 요인으로 해석엔진의 신뢰성 확보를 가장 중요시 한 반면, 가격 경쟁력 측면에서는 6%만이 중요한 결정 요인으로 꼽았다(그림 6). 여기에 핵심 해석엔진 기능의 차별화(7%)를 구매 결정 요인으로 선정한 응답자까지 포함할 경우 핵심엔진의 신뢰도와 기능이 S/W 구매에 결정적인 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 그 외에 GUI 등의 사용자 편의성(12%)과 교육 및 유지보수(4%)에 대한 요구도 향후 상용화에 중요하게 고려해야 할 요소라 할 수 있다. 이러한 핵심엔진의 중요성에 대한 설문결과는 SMS를 사용해본 경험이 있는 사용자들의 설문에서도 확인할 수 있다. SMS 사용자를 대상으로 조사한 결과, 62%의 사용자가 핵심 해석엔진의 신뢰성과 기능을 중요시 한 반면, 구매가격을 중시하는 사용자는 9%에 불과하였다. 또한 기존 SMS 사용자의 경우 일반 수자원 상용 S/W에 비해 사용자 편의환경(16%)과 사용자 교육(13%)을 더 중요시 하고 있음을 알 수 있다. 이는 국내 사용자 환경에 적합한 S/W가 경쟁력을 가질 수 있음을 의미하는 것으로, 기존 국외 제품 개선 요구사항 조사에서도 비슷한 결과를 확인할 수 있는데, 응답자 중 38%는 기존 국외 제품이 국내 사용자 환경에 적합하지 않는 것으로 생각하고 있는 것으로 나타났다.

이상의 설문조사 결과를 요약하면, RAMS의 상

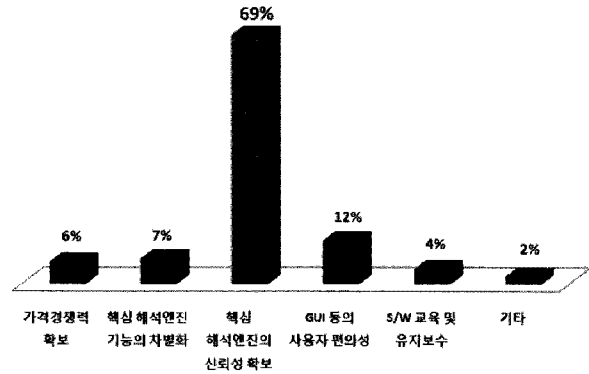


그림 6. S/W 구매결정 요인 설문조사 결과

용화 성공을 위해서는 핵심 해석엔진의 신뢰성 확보와 GUI 등의 사용자 편의환경, 사용자 교육 지원 등이 가장 중요한 요소가 될 것임이 자명하다. 따라서 2010년 RAMS 정식 상용버전 출시를 위해서는 실제 자연 하천을 대상으로 한 RAMS 적용을 통해 핵심 해석엔진에 대한 검증을 수행함으로써 신뢰성을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 나아가 적극적인 사용자 요구사항 수렴을 통해 사용자 편의환경을 개선함으로써 사용성과 편의성까지 확보한다면 RAMS의 성공 가능성은 보다 높아질 것이라고 조심스럽게 전망해 본다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구 개발 사업인 수자원의 지속적 확보 기술 개발 사업단의 연구비 지원(과제번호 : 2-3-3)에 의해 수행되었습니다. ☞

참고문헌

- 고태진, 장형상, 김도현, 김유진 (2007). 2차원 수리해석을 위한 범용 소프트웨어(RAMS) 개발, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 423-427.
- 서일원 (2007). RAMS(River Analysis Modeling System) 개발, 2단계 보고서, 과학기술부.
- 서일원 (2009). RAMS 개발, 하천과 문화, Vol. 5, No. 3, pp. 106-113.