

수자원관리에서 분포형 수문모델링의 역할

김성준 (건국대학교 지역건설환경공학과 조교수)

1. 수자원관리에서의 제반 문제점

“수자원의 부족 및 남용은 지속가능한 개발과 환경보호 차원에서 심각한 위협이 되고 있다. 인류의 건강과 복지, 식량안보, 산업발전 그리고 생태계는 수자원과 토지자원 면에서 과거에 해왔던 것보다 더욱 효율적으로 관리하지 않는다면 엄청난 위기에 처하게 될 것이다”. (ICHE, 1992)

수문학자와 수자원 관리자들이 직면하고 있는 현재의 상황과 미래의 도전은 물과 지속가능한 개발에 관한 Dublin 성명의 서문 (ICHE, 1992)에서 요약되고 있다. Dublin 성명은 물과 환경에 관한 국제회의에서 114 개국의 정부임명 전문가들과 80개 국제, 정부간, 비정부 기구의 대표자들에 의하여 채택되었다 (1992년 6월 Rio de Janeiro에서 개최된 UNCED회의를 위한 준비회의).

약 4000년전 페르시아, 이집트, 바빌론의 고대문명 이래로, 수자원과 용수공급 기술은 수많은 사회의 개발과 구성에 있어서 기본적인 역할을 수행하여 왔다.

그러나 지난 수십년 동안의 급격한 인구증가와 산업발전은 지구상의 거의 대부분의 지역에서 토지와 수자원에 압박을 가해왔다. 생활, 농업, 공업, 위락 및 기타 목적의 물 수요량의 증가와 지표수 및 지하수 오염의 확대로 인하여 수자원은 부족한 자연자원으로 전환 된 것이다.

양질의 물을 확보하는 것은 인류의 생존, 경제 발전 그리고 환경을 위하여 결정적인 요인이 된 것이다. 그럼에도 불구하고 수자원은 효율적이고도 지속

가능한 방법으로 관리되지 못하고 있다. ICWE와 UNCED회의에서는 과거 수자원관리의 경험에 초점을 맞추어 향상된 미래 수자원관리를 위한 새로운 원칙들을 도출하여 상호 동의하였다. 세계은행은 후속 방침서 (World Bank, 1993)에서 특별히 다음과 같은 세 가지 문제에 대하여 강조하였다:

- ① 기관(agency), 관할구역(jurisdictions), 영역(sectors)간의 상호의존성을 고려하지 않는 단편적인 공공투자 사업 및 영역 관리,
- ② 경제적인 가격책정, 재정적 설명의무, 주민 참여에 대한 필요성을 무시하고 또한 빈곤층을 위한 지원 및 혜택을 효과적으로 제공하지 못하는 정부산하기관에 대한 과도한 신뢰,
- ③ 수질, 건강, 환경관련 관심사를 무시하는 공공 투자 및 법규.

세계은행의 새로운 정책에 대한 주요 골자는 물에 대한 지방분산적 관리와 배분구조, 가격정책에 대한 신뢰, 수자원 사용자의 전적인 동참과 더불어 포괄적인 수자원 정책 및 경제재로서의 수자원 처리를 채택하고 있다.

수자원 관리에 대한 이러한 새로운 접근방법은 무엇보다도 먼저 경제학자, 수자원 관리자 및 기술자, 수문학자, 생태학자 간의 전문가적인 상호 노력뿐만 아니라 수자원 계획과 관리 과정에서의 수평적인 통합을 요구하고 있다. 이러한 다양한 원칙과 영역간의 협조 및 통합은 지금까지는 제대로 이루어지지 않았으므로, 앞으로 도전해 볼 만한 사항이며 또한 매우 중요하다.

한편 심각해지고 있는 수자원 문제에 대한 새로운 관리기법은 합리적이고도 과학적인 원칙과 효과적인 기술에 기반을 둔 향상된 수자원 관리도구를 요구한다. 향상된 기술의 주요 특징으로는 수자원의 전반적인 상황을 보여줄 수 있고 또한 수자원 관리와 관련된 서로 다른 원칙과 영역간의 협력을 촉진시킬 수 있어야만 한다. 이는 특별히 설계된 정보시스템에서 수문순환의 전반적인 양상, 수량·수질·생태관련 정보 그리고 수문학적, 생태학적, 경제학적, 행정적 정보를 다양한 수준별로 의사결정자에게 제공할 수 있어야 한다.

본 고에서는 분포형 수문모델의 역할에 대하여 기술하고자 한다. 분포형 수문모델은 상기의 능력을 제공하는데 있어 필수적인 요소이기 때문이다. 따라서 분포형 수문모델은, 현재로서는 만족스럽지 못하지만, 미래의 수자원 관리를 향상시키는데 있어 중요하며 또한 필요한 수단이다.

2절에서는 수자원과 관련된 주요 현안과 경향에 대하여 기술하고, 3절에서는 2절에서 제시한 문제들의 분석 및 해결에 도움을 줄 수 있는 수문학적 모델링에 대하여 기술하고자 한다. 4절은 수자원관리에 있어서 분포형 수문모델링이 가지고 있는 제약조건에 대하여 논의하고자 한다.

2. 수자원에서 주요 관심사와 경향

2.1 수자원 개발/이용의 효과

1940년에 전 세계의 물이용량은 약 1,000km³/년이었다. 이는 1960년에 두 배가 되었고, 1990년에 다시 두 배로 늘어났다(Clarke, 1991). 지구상의 대부분의 국가에서는 향후 또다시 두 배로 증가할 경우에 대한 충분한 수질을 만족하는 사용 가능한 수자원을 확보하지 못하고 있다. 물사용 효율에 있어서 어떤 주요한 향상이 이루어지지 않는다면, 중국, 인도와 같은 여러 나라의 발전과 더불어 앞으로 향후 10년 내에 이와 같은 상황을 맞이하게 될 것이라고 예측하고 있다. 지표수와 지하수 자원의 끊임없는 개발의 한 가지 공통적인 결과는 지하수위와 지표수체의

수위를 주기적으로 또는 지속적으로 낮추는 결과를 초래하여, 사용가능한 물의 양과 질이 모두 제한된다는 것이다.

과도한 그리고 지속적인 지표수의 개발과 지하수의 채수로 인한 수량과 수질 그리고 접근성의 변화는 그 주변 지역의 식물상과 동물상에 회복 불가능한 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 나이저강은 극심한 가뭄과 더불어 관개지역의 증가(증발에 의한 물손실이 크게 늘어남)로 인하여 역사상 처음으로 1986년에 완전히 말라버렸다. 또 다른 주요한 지역적인 예로는 콜로라도강(Carrier, 1991)과 아랄해를 들 수 있는데, 이들 지역은 상류유역에서 물을 과도하게 사용하므로서 심각하게 악화되어 왔다.

지하수위의 하강과 더불어 지하수의 과도한 채수로 인한 또 다른 역효과로는 유동물의 감소 또는 지하학적 조건의 변화로 인하여 관정 주변에서의 오염 농도를 증가시키며, 염수 침투와 지반 침하의 위험을 증가시키는 것이다. 후자의 현상은 방콕에서 찾아볼 수 있는데, 이 도시에 물을 공급하기 위하여 10년 이상 지하수를 채수한 지역에서 지반침하가 발생하여 어떤 지역에서는 10cm/년의 침하가 일어나서 심각한 범람을 야기하였다(BMA, 1986).

2.2 관개

관개의 목적은 일정 기간동안 해당 지역에서 경작이 가능하게 하는 것이며, 강우의 조건하에서 작물의 생산을 안정화시키는 것이다. 관개용수의 일반적인 수원은 하천, 강, 저수지의 방류량 또는 지하관정으로부터의 채수량 등이다. 이와 더불어 전기에 지표수 만으로는 관개가 불가능한 지역에서는 지표수와 지하수를 결합하여 사용하는 곳도 있다.

1980년대 중반에 관개지역은 전 세계적으로 약 220백만ha에 달하였다. 이는 단지 전체 농경지의 15%에 해당하지만, 모든 농업생산물의 30-40%를 차지하고 있다(FAO, 1990).

관개농업은 전 세계적으로 약 70%의 물이 회수되지만, 현재 많은 관개시스템들의 전반적인 성능은 매우 낮다. 부적절한 운영과 유지 그리고 비효율적인

관리는 환경문제까지 야기하였다. 많은 관개조직에서, 관개를 위하여 전용된 물의 60%가 수원으로부터 작물에 도달하기까지의 중간과정에서 손실된다. 따라서, 관개효율을 높임으로써 물을 보존하는 잠재력은 엄청나다고 할 수 있다.

주요 환경문제는 배수시설을 빈약하게 또는 갖추지 않고 과도한 관개수를 공급함으로써 발생한다. 이러한 조건하에서는 지하수위가 상승하고 궁극적으로는 염수가 침입하면서 토지가 침수되어 작물의 수확량이 감소된다. 메소포타미아와 고대 스리랑카와 같은 이러한 지역에서 한때 번창했던 문명은 침수 및 염분농도의 증가로 인하여 결국 쇠퇴되었다. 오늘날에는 이러한 현상이 인도, 나일, 티그리스, 유프라데스 그리고 전세계적으로 반건조 및 건조지역에서 널리 퍼져 있다. FAO(1990)에 따르면, 전세계 관개지역의 약 15%가 염분에 심각하게 영향을 받고 있으며, 또 다른 30%정도의 지역이 어느 정도 두드러진 영향을 받고 있다고 한다.

2.3 토지생산성 퇴화 및 토양 침식

토지 퇴화 및 토양 침식은 전세계적으로 해결하여야 할 또 다른 주요한 관심사이다. 토양침식은 가치 있는 표토층의 손실로 이어지며, 하류지역에 침니로 인한 막 형성(silting), 퇴적, 탁도 문제 및 오염을 야기한다.

예를 들어, 유럽에서는 지중해 연안의 경사지에 위치한 농경지와 북유럽의 사질, 양질 및 백악질 토양에서의 침식율은 10-100톤/ha/년에 달한다(Morgan 등, 1992). 이러한 침식율은 오염의 조절과 토양자원의 보전을 위하여 일반적으로 허용되는 최대 침식율인 1톤/ha/년과 비교할 만 하다(Evans, 1981).

개발도상국가에서는 인구와 축산이 증가하면서 과도한 목축, 경작지 개발, 뿔나무의 수료로 인한 남벌로 토지퇴화가 가속화된다. 반건조 및 건조지역에서의 이러한 퇴화는 사막화(desertification)라고 한다. FAO(1990)에 따르면, 사막화는 지역내 천수지역의 거의 75%에 영향을 미치며, 이 지역 농업인구

의 60%(280 만명)가 주거하고 있다고 한다.

상류유역 토양과 수자원 보전의 중요성에 대한 지식의 부족과 무시는 이 지역에 주거하는 사람들의 삶에 영향을 끼칠 뿐만 아니라 홍수와 저수지의 퇴적으로 인하여 하류지역 사람들에게 무시할 수 없는 피해와 손실을 주게 된다. 그 결과, 열대 개발국가의 상류유역 중에서 160백만ha가 심각하게 훼손된 것으로 추정하고 있으며, 이는 전 세계 인구의 약 20%가 영향권에 들어 있다고 한다(Danida, 1988).

2.4 지표수 및 지하수 오염

지난 수십년전 까지만 해도 건조지역의 염분화가 발생하는 지역을 제외하고는 수질은 상대적으로 중요하지 않게 여겨져 왔다. 그러나 인구의 증가, 도시화, 산업화는 수요량의 증가와 더불어 폐수방류에 의한 수질오염이 악화되어 오늘날 물의 사용은 여러 지역에서 수량보다는 수질에 의하여 제한을 받고 있다.

지표수 오염의 주요 과제로는 병원균, 유기물 오염, 중금속, 농약, 산업 유기물, 산성화 및 부영양화 등이다(WHO, 1991).

불포화 지역 및 관정 오염의 심각성과 그 정도는 관정에 대한 상대적 비접근성 그리고 일반적으로 관정시스템에 대한 신뢰성 있는 정보의 부족으로 인하여 과거에는 과소평가되어 온 것이 사실이다.

여러 산업국가에서 지하수 오염은 지난 20년 동안 주요 해결과제로 다루어져 왔다. 예를 들어, 덴마크에서는 15년전 만해도 지하수를 사용하는 99%이상의 지역에서 지하수 오염의 위험은 적은 것으로 믿고 있었다. 오늘날 조사한 결과로는 매립, 화학물질 투기, 기름탱크 누수 등으로 인하여 10,000여개 이상의 심각한 지하수 오염원이 존재한다고 보고하고 있으며, 장래 지하수자원을 확보하기 위한 모니터링과 개선에 매년 약 70백만불을 투자하고 있다. 또한 농업활동에 의한 질소 및 농약오염이 매우 심각한 위험요소로 인식되고 있어, 농업방식의 큰 변화를 요구하고 있다. 이러한 효과가 장래에 나타나려면 매우 값비싼 비용을 치러야 할 것으로 판단된다.

2.5 홍수 및 가뭄

자연재해로부터의 경제적 손실은 1960년대와 1980년대 사이에 3배 이상 증가하였다(ICWE, 1992). 여기에서 홍수와 가뭄은 다른 자연재해보다도 더욱 많은 인명과 재산피해를 야기하였다(Rodda, 1995).

저수지, 둑과 같은 홍수방어 구조물의 끊임없는 건설에도 불구하고 여러 나라에서 홍수피해는 지속적으로 증가하고 있다. 범람원을 포함한 토지이용의 증가, 대규모 저수지 및 조절시설의 생태학적 영향에 대한 부정적 인식 확산으로 인하여 이러한 홍수피해는 앞으로 더욱 크게 늘어날 것으로 판단된다. 미시시피강 및 라인강(두 지역 모두 홍수조절에는 문제가 없는 지역으로 알려져 있음)에서 발생한 최근(1993, 1994, 1995)의 대홍수는 기후 변화 또는 토지이용 변화 또는 두 가지 모두에 의해 수문기작이 변화된 것인지에 대한 불확실성만을 증폭시켰다.

2.6 수생태계

물은 환경에서 생명의 원천을 이루는 부분이며, 인류의 복지를 위하여 궁극적으로 의존해야만 하는 여러 유형의 생명체의 인식처이다. 흐름의 변경은 생태계의 생산력을 감소시키고, 어업, 농업, 목축업을 황폐화시켰으며, 이와 같은 산업에 의존하는 농촌사회를 사향화시켰다. 다양한 종류의 오염은 물 공급량을 감소, 더욱 값비싼 수처리의 요구, 수생태계의 파괴, 위락기회의 감소 등과 더불어 이러한 문제들을 악화시킨다(ICWE, 1992).

그 예로써, 습지(wetland)가 이전에는 버려진 땅(wasteland)으로 잘못 비추어지면서 20세기 동안에 급속도로 파괴되어 왔다. 그 결과 미국에서는 자연습지의 54%가 1970년 중반에 사라졌으며(Tiner, 1984), 이와 유사한 현상들이 유럽의 여러 국가에서 발생하였다(Adams, 1986; Dugan, 1993).

2.7 기후 변화

인간활동에 의한 심각한 기후변화, 특히 대기 중의

CO₂ 농도의 증가와 관련하여 다음 10년 동안에 발생할 것이라는 것이 학계의 정설이다.

기후변화에 따른 가장 중요한 영향은 수문순환의 변화 그리고 이와 관련된 수자원 관리시스템에 미치는 효과가 될 것이다. 따라서, 어떤 지역은 물부족을 겪게 되고, 어떤 지역은 그 동안 겪어보지 못한 홍수 피해를 경험하는 위협에 처하게 될 것이다.

3. 수자원관리에서 모델의 적용

다양한 수자원 문제를 해결하기 위한 수문모델 및 이들의 적용성을 고찰한 여러 논문들이 있다; Stanbury(1986), Bowles와 O'Connel(1988), De Coursey(1988), Mangold와 Tsang(1991), Feddes 등(1988). 기존 모델에 대한 고찰은 대부분 과학적 그리고 어떠한 면에서는 기술적 측면에 초점을 맞추고 있다. 단지 수 편의 논문만이 모델의 실질적인 적용과 관련된 문제를 다루고 있다.

EC(European Communities) 위원회의 검토에 따르면(SAST, 1992), 기존 모델링 기법의 현황을 과학적 그리고 기술적 측면으로 그 특징들을 기술하고 있다. 더 나아가 SAST(1992)는 모델의 실질적인 활용에 대한 현황을 제시하고 있다. 이러한 현황의 최신 내용들을 정리하면 표 1과 같다. 이는 모델의 적용가능성이 있는 각 분야에 대하여, 그 현황을 "실질적으로 운영 및 활용이 안되고 있는 것"부터 "세계의 여러 지역에서 전문적인 표준도구"로 구분하여 정량적으로 평가하고 있다. 이에 추가하여 다양한 분야에서 모델의 실질적인 적용을 위한 주요 제약조건들도 제시하고 있다.

현재 각각의 기관이 적용하고 있는 다양한 모델링 시스템들의 과학적, 기술적 현황은 매우 다양하다는 것을 알 수 있다. 표 1에 나타난 현황은 모델링 시스템의 최신 내용을 보여주고 있다. 표 1의 몇몇 내용에 대해서는 다음의 3.1-3.9절에서 논의하고 상세히 설명하고자 한다.

3.1 수자원 평가

수자원의 평가는 수자원의 지속가능한 개발, 관리, 제어에 대한 평가가 가능하다는 기반 하에 수자원의 양, 질, 그리고 이용성을 평가하는 것이다.

견고한 수자원 평가는 양질의 수문자료의 확보와 적절한 모델링 기법의 적용을 모두 요구한다. 초점이 지표수에만 집중되어 있는 경우, 또는 지하수에만 집중되어 있는 경우에는 적절한 모델링 도구는 개념적인 집중형 강우-유출모델 또는 전형적인 2차원 지하수모델을 적용하는 것이 일반적이다. 지표수와 지하수의 상호관계가 중요한 경우에는 물리적인 기반의 분포형 유역통합모델과 같은 보다 포괄적인 모델링 도구가 요구된다.

일반적으로 어떠한 유형의 적용이든지 간에 적절한 모델 코드가 존재하며, 여러 경우에 실제로 사용되고 있다. 한편 수자원 평가를 위한 다양한 모델의 적용은 앞으로 더욱 필요하게 될 것이다. 이에 대한 주요한 제약사항은 기존의 시스템을 유지하려는 기관의 고정관념을 들 수 있다. 그러나 보다 향상된 사용자 편의시스템을 이용한 매개변수 추정방법과 같은 기술의 혁신 또한 중요하므로 이에 신속히 적용할 필요가 있다.

3.2 관개

관개영역은 몇몇 특출한 예를 제외하고는 수문보다는 훨씬 낮은 기술수준에 머무르고 있다고 평가된다. 따라서 현대기술을 활용한 보다 향상된 관개관리

표 1. 다양한 문제 유형에 따른 수문 모델링 시스템의 적용 현황

문제의 유형	시스템 적용 현황				
	과학적기반의 적합성	과학적 검증 정도	시범유역에서의 검증	실질적 운영	실질적 운영상의 주요 문제점
수자원 평가 * 지하수 * 지표수	양호 매우 양호	양호 매우 양호	적합 적합	일부지역 운영 일부지역 운영	행정/경제적 지원 필요 행정/경제적 지원 필요
관개	양호	양호	일부 적합	매우 제한적	기술 및 행정/경제적 지원 필요
토양침식	보통	보통	매우 제한적	없음	과학적 발전 필요
지표수 오염	양호	양호	적합	특정지역 운영	행정/경제적 지원 필요
지하수 오염 * 점원 (매립) * 비점원 (농업)	양호 보통	양호 보통	일부 적합 매우 제한적	일부지역 운영 매우 제한적	기술 및 행정/경제적 지원 필요
실시간 예측 * 하천유량/수위 * 지표수 수질 * 지하수위 * 지하수 수질	매우 양호 양호 매우 양호 보통	매우 양호 양호 매우 양호 보통	적합 적합 일부 적합 없음	여러지역 운영 일부지역 운영 매우 제한적 없음	없음 자료부재, 행정/경제적 지원 필요 자료부재/기술적 발전 필요 과학적 발전 필요
토지이용 변화의 영향 * 수량 * 수질	양호 보통	보통 보통	보통 보통	매우 제한적 없음	과학적 발전 필요 과학적 발전 필요
수생태계	보통	보통	매우 제한적	매우 제한적	과학적/기술적 발전 필요
기후변화의 영향 * 수량 * 수질	양호 보통	양호 보통	보통 없음	매우 제한적 없음	과학적 발전 필요 과학적 발전 필요

에 대한 잠재력은 경제 및 환경 측면에서 엄청나다고 할 수 있지만, 이와 같은 시도는 극히 드물게 이루어지고 있다.

관개관리의 현대화를 위한 필요조건은 다음과 같은 내용으로 정리할 수 있다.

- ① 최신 센서, 실시간 자료전송, 원격탐사자료로부터의 공간정보를 포함한 보다 향상된 자료수집 기술.
- ② 해당 지역의 공간적 분포에 기반을 둔 토양수분과 지하수 상태를 전반적으로 묘사할 수 있는 자세한 수문/수리 모델링 뿐만 아니라, 배분체계와 배수로 시스템에서의 흐름과 저류에 대한 동력학적 모델링. 이에 대한 좋은 예는 Lohani 등 (1993)에서 찾아볼 수 있다.
- ③ 저수지 운영 및 수리제어구조물의 관리를 위한 최적화 기술.

관리자 및 기술자들의 기술혁신에 대한 배타적인 관념과 통합적인 사용자 편의제공기술의 진척이 미흡하지만, 현재의 과학적인 기반으로 판단할 때 문제가 없다.

3.3 토양 침식

토양수 보존영역 또한 수문학적 모델링과 비교하여 볼 때 상대적으로 낮은 기술수준을 보이는 것으로 평가된다. 유역으로부터의 토양 침식을 추정하는 가장 보편적인 방법은 아직까지는 범용토양손실방정식(USLE)이다(Wischmeier와 Smith, 1965). 이 방법은 원래 수작업으로 개발된 매우 간단하고도 경험적인 방정식이다(Lorup과 Styczen, 1996).

다수의 물리적인 기반의 토양침식모델들이 개발되고는 있지만, 대규모 유역에 적용하기 위해서는 그 과정을 안정화시키는 보다 많은 연구가 필요하다.

3.4 지표수 오염

지표수 수질모델링의 최신 동향은 과학적 그리고 기술적 측면에서 비교적 좋게 평가되며, 개발된 모델들 또한 광범위하게 사용되고 있다.

3.5 지하수 오염

지하수 오염과 관련된 연구의 주요 문제점으로는 지질구조의 상세한 3차원적 도면이 충분히 확보되어야 하며, 이를 기반으로 궁극적으로는 오염물질의 이송과 확산을 추정하는 수리학적 매개변수의 공간적 변이에 대한 자료를 획득하는 것이다(Hansen과 Gravesen, 1996). 일반적으로, 지하수의 흐름 및 이동과 관련된 모델링 기법은 자료수집 문제와 비교하면 훨씬 더 발전되어 있다(Storm과 Refsgaard, 1994).

지하수의 수질에 대해서는 현재 그 과정을 계속 정립하고 있으며, 유기 및 무기질의 지화학적 과정과 이들간의 상호작용과 관련된 매개변수들의 평가와 관련된 연구가 필요하다(Engesgaard, 1996). 농업 화학적 비점원 오염에 대해서는 작물의 뿌리근역에서의 기본적인 기작에 관한 연구가 필요하며, 특히 경운방법에 따른 농경지 관리기법의 중요성과 관련된 연구가 요구된다(Thorsen 등, 1996).

3.6 실시간 예보

최신의 실시간 자료수집시스템과 연계한 수문모델들은 실시간 홍수예경보를 목적으로 한 표준도구로 활용되고 있다. 현재로서는 수문동력학적 하천추적 모델과 연계한 개념적인 집중형 강우-유출모델을 적용하는 것이 이와 같은 시스템들의 최근 동향이지만, 앞으로는 보다 정교한 물리적인 기반의 분포형 모델이 정확도와 전반적인 신뢰도 측면에서 상당히 수준 높은 정보를 제공할 수 있을 것이다.

과학적인, 보다 넓게는 기술적인 차원에서 보면, 지표수 수질 그리고 지하수 흐름 및 수위를 추정하는 분야에서도 실시간 예보시스템을 적용하는 것이 가능하다. 이와 같은 분야에서도 이미 언급한 바와 같이, 관리자들의 기술혁신에 대한 배타적인 관념이 시도 자체에서 큰 걸림돌이 되고 있다.

3.7 토지이용 변화의 영향

토지이용의 변화가 수량 및 수질에 미치는 영향은

예측하는 것이 큰 관심사로 대두되고 있다. 예를 들어, 도시화 및 산림 벌채가 홍수 및 가뭄에 미치는 영향 그리고 변화된 경작 유형과 기타 농업활동이 토양 침식과 지하수 수질에 미치는 영향이 수자원의 관리 측면에서 주요 사항이다(Lorup과 Styczen, 1996; Thorsen 등, 1996).

기존의 모델링 도구들이 이와 같은 과제들을 해결하는데 매우 유용하기는 하지만, 보다 폭넓게 모델을 적용해야 하는 관점에서 보면 모델링의 세부 과정 및 매개변수들에 대한 기본적인 지식이 부족하다는 것이 주 제약조건이다.

3.8 수생태계

습지와 수생태계의 모델링은 매우 간단한 수문학적 모델링 도구를 사용하여 적용하여 왔다. 이는 생태학적인 과정 자체가 매우 복잡하고 요구되는 자료 또한 방대하며, 최근까지 가장 최신의 수문모델 조차 생태관련 모델개발자들에게 충분히 상세한 정보를 제공하지 못하고 있기 때문이다. 이러한 이유로 수생태계에 대한 포괄적인 모델링은 극히 드물게 시도되고 있다.

그러나 수생태계 내의 관리를 목적으로 예측능력을 구축하기 위한 필수 조건은 가장 최신의 물리적인 기반의 분포형 모델링 시스템을 개발하여 활용하는 것이다. 이에 대한 포괄적인 범람지역 모델의 예를 Sorensen 등 (1996)에서 찾아볼 수 있다.

따라서 현재로서는 이 분야에 대한 과학적, 기술적 도약이 필요하다. 이를 위해서는 Kalman 필터링, 신경망, 유전자 알고리즘과 같은 내용들이 정착하여 역추적 기법에 도입되면 어느 정도 해결될 수 있다고 판단되며, 보다 향상된 지식기반의 생태학적 모델들도 이 분야의 발전에 크게 기여할 수 있다는 것은 의심할 여지가 없다(예, Abbott 등, 1994).

3.9 기후변화의 영향

기후변화에 따른 수문학적 영향의 예측은 수문 분야에서 직면한 가장 어려운 문제 중의 하나이다. 현재의 기술로 강수, 기온, 증발의 특정한 변화가 하천

유출, 토양수분, 지하수 함양량에 미치는 영향에 대한 평가는 어느 정도의 정확도를 가지고 추정이 가능하며, 여타의 간단한 모델로도 기후변화에 따른 여러 가지 견해를 생산해낼 수 있도록 구축하는 것이 가능하다.

그러나 기후변화는 또한 점차적으로 수자원에 심각한 영향을 미칠 것으로 예상되는 식생의 천이적 변화 그리고 농업형태의 변화를 가져올 것이 분명하다. 따라서 이와 관련된 문제에 대한 연구는 앞으로 상당한 규모로 이루어져야 한다.

현재 기후모델을 개발하는데 있어 주요한 단점은 토지피복별 지표면과 대기간의 상호작용을 지배하는 지표면에서의 과정 (특히 토양수분과 이의 공간적 변이)을 매우 간단하게 처리한다는 것이다. 분포형 수문모델이 이와 같은 목적으로는 적합하다고 판단되지만, 두 학문분야 간의 교류의 부족으로 아직까지는 그다지 진척이 없다고 할 수 있다.

3.10 인간활동에 따른 역사적 재건설

하천 유역 및 기타 지역의 수문이 장기간의 토지이용 변화와 각종 구조물 건설에 따라 변화되어 왔기 때문에 이의 재건설이 주요 관심사로 자연스럽게 등장하고 있다. 사실 시간적으로는 굉장한 긴 역사를 가지고 있어서 “수문고고학 (hydrological archaeology)”이라고 부르는 편이 오히려 적합하다. 이는 자연적인 홍수재해에 대한 위험도 평가, 보험, 투자계획, 법제 및 소송을 목적으로 한 원인규명과 가능한 치유대책 차원에서 필요하다.

4. 수자원관리에서 분포형 수문모델링의 실용화를 위한 제약조건에 관한 고찰

4.1 분포형 수문모델링의 필요성

3절에서 논의한 바와 같이 물리적인 기반의 분포형 모델에 대한 다양한 개발의 요구도가 증대되고 있는 것은 명백한 사실이다. 전형적인 개념적 집중형 수문모델들은 지금도 수자원 평가 및 홍수/가뭄 예측에 대부분 적합하지만, 보다 많은 문제들을 해결하기

위해서는 좀 더 나은 분석도구가 필요하다는 것이 일반적인 견해이다. 이와 같은 측면에서 분포형 모델이 인간활동에 의한 영향들에 대한 예측능력을 향상시켜 줄 수 있다는데 관심을 가질 필요가 있다. 따라서 수자원의 관리도구로서 분포형 모델을 활용하기 위한 노력이 늘어나고 있다.

본 고에서는 강우-유출 모델링에 초점을 맞추어 분포형 모델과 집중형 모델간의 역할과 능력에 대하여 논의하고 있지만, 3절에서 열거한 다양한 분야에서의 복잡한 문제들에 대해서도 분포형 모델의 가능성과 잠재력이 있음을 인식해야 한다.

4.2 분포형 수문모델의 적용관련 제약조건

컴퓨터 기반의 수문모델링은 지난 30년 동안 꾸준히 이루어져 왔다. 그럼에도 불구하고 Klemes (1988)는 수문학에서의 과학적인 전통에 대하여 심도있게 논의하였듯이, Sacramento 모델과 같은 개념적, 집중형, 결정론적 수문모델들은 과학적으로 논리적이기 못한 기술적인 도구에 불과하다고 하였다. Klemes(1988)는 전반적으로 이와 같은 모델로부터 예측된 결과에 대한 신뢰성에 의문을 가졌다. Abbott(1972) 또한 이와 유사한 논의를 한 바 있다.

물리적인 기반의 분포형 유역모델에 대한 필요성과 그 기본 개념은 Freeze와 Harlan (1969)이 처음으로 제시한 바 있다. Freeze의 선구자적인 제안이 촉발되어 1976년에 유럽의 세 기관에서 SHE (the Systeme Hydrologique Europeen) (Abbott 등, 1986a,b)의 개발을 시작하였다. 그 이후로 여러 유형의 분포형 모델들이 개발되기 시작하였다.

이후 20년 동안의 모델개발에 대한 노력이 있었음에도 불구하고, 오늘날 분포형 수문모델들은 잠재력을 보여주는 정도로 활용되고 있다. 예를 들어, SHE의 개발을 착수한 후인 1978년에 유럽위원회가 수행한 바 있는 초기 시장조사에서는 이러한 모델링 기법의 적용을 통하여 21억 ECU에 달하는 시장을 형성할 것이라고 예측한 바 있다. 그러나 개발자들의 예상과는 달리 두 가지 SHE버전 (MIKE SHE와 SHETRAN)은 1994년 후반까지 전세계적으로 약 60개 기관에 배

포된 상태로서 초기 예측결과에 훨씬 못 미치고 있다. 이와 같은 결과에 대한 자연적인 설명이 필요하다. 지난 20년 동안의 SHE의 개발과 적용과 관련된 경험을 통하여 기대 이하의 느린 발전에 대한 주요 이유와 제약조건에 대하여 고찰하고자 한다.

4.2.1 자료의 확보문제

물리적인 기반의 분포형 모델을 충분히 활용하기 위한 필수조건은 지질, 토양, 식생과 같은 자연적인 매개변수와 용수 및 채수, 농업활동, 오염물질의 배출량 등과 같은 인위적인 영향에 대한 자세한 공간정보를 포함한 대규모 자료가 구비되어야 하며, 이들 자료를 손쉽게 획득할 수 있어야 하는 것이다.

대부분의 경우에 이와 같이 필요한 자료들은 존재하지 않으며, 설령 자료가 있다고 하더라도 데이터베이스가 아직은 제대로 구축되지 않아서 쉽게 확보할 수 없다고 할 수 있다. 문제를 더욱 어렵게 만드는 것은 수문 기상자료와 더불어 농업, 토양, 지질 등 다양한 분야의 자료원을 사용해야 하는데 이를 위해서는 기관간의 행정 문제가 결부되어 있다는 것이다.

그러므로 분포형 모델들은 이러한 자료들이 준비된 지역에 국한하여 개발을 시도하여 왔으며, 수집한 자료들을 분포형 모델링에 적합하게 수정 및 호환하여야만 하였다. 따라서 대부분의 분포형 모델들은 다양한 수준의 가용자료 상태에서 실행할 수 있으며, 지형자료와 식생분포도 등의 자료만으로도 의사결정에 지원될 수 있는 경우에 한정되고 있다.

지난 수년동안은 원격탐사기법이 분포형 수문모델에 사용가능한 공간자료를 제공해줄 수 있다는 기대감이 확산되어 왔다. 그러나 적설분포와 토지이용/피복도를 제외하고는 원격탐사자료가 원활하게 활용되지 못하고 있다. 최근 발사된 새로운 위성들이 또 다른 기대와 가능성을 보이고 있다. De Troch 등 (1996)이 제시한 바와 같이, 분포형 수문모델과 결합한 원격탐사자료의 대규모 활용은 획기적인 진전이라고 할 수 있다.

앞으로 자료의 활용성을 크게 향상시킬 수 있는 중요한 분야는 GIS기술의 적용이며, GIS 자료는 분포

형 수문모델과 뛰어난 결합능력을 가지고 있다 (Deckers와 Te Stroet, 1996).

4.2.2 수문과정의 과학적 이해 부족

새로운 모델링 기법이 소개되고 그 과정에 대한 연구가 진행되면서 소규모 (small scale)에서 검증된 흐름, 운송, 수질과정을 보다 큰 지역을 대상으로 규모를 확대하는 과정에서 과학적 이해의 부족 및 단점들이 발생하고 있다. Abbott와 Refsgaard (1996)가 이와 관련된 주요 문제들을 다루고 있다.

한편 이러한 결점들이 분포형 수문모델의 실질적인 활용에 걸림돌이 되어온 반면, 이러한 모델들의 지속적인 적용을 통하여 새로운 관점에서 접근하여 온 결과 분포형 모델링의 이해에 그 동안 진전이 있어 온 것도 사실이다.

4.2.3 수문과 수자원공학에서의 전통

SHE와 같은 물리적인 기반의 분포형 모델코드는 그 동안의 수문분야에서 알려진 다른 어떠한 코드보다도 획기적인 도약을 이룩하였다. 이 모델은 당시의 몇몇 수문학자들만이 가지고 있었던 계산수리분야에서의 기법들을 이용하여 개발하였다. MIKE SHE와 같이 제 4세대 사용자편의 모델링시스템을 활용하여 이제는 여러 수치 알고리즘 문제들이 검증된 알고리즘을 이용하여 코드를 개발함으로써 많이 극복된 상태이지만, 모델링 과정에서 본질적으로 안고 있었던 제약조건인 물리적인 시스템의 복잡성을 통합하여 이해하는 데에는 아직도 해결하여야 할 문제가 많다. 현재로서도 극소수의 공학자 및 관리자만이 이와 같은 수문과정의 물리적 복잡성을 총체적인 관점에서 접근하고 있는 실정이다.

이러한 어려움은 수문 그 자체의 본질적인 면에서도 발생되지만, 대부분의 전문가들이 물리적인 과정을 전체적으로 보는 시야가 부족하다는 데에도 그 원인이 있다. 일반적으로 토양물리학자, 식물생리학자, 수문학자 등은 각자 전체 시스템에 대하여 부분적인 견해를 가지고 있다. 경제성을 고려한 물리적인 기반의 분포형 코드를 개발하기 위해서는 이와 같이 다양

한 분야의 전문가들이 골고루 필요한데, 이들을 충분히 확보하고 있는 기관은 극히 드물다.

4.2.4 기술적 제약

수리공학자들이 경험에 따르면, 수문모델 개발자들을 포함한 전문가 집단을 대상으로 모델링 기법을 전수하여 주기 위해서는 소위 제 4세대 모델링 시스템 (사용자편의 소프트웨어)이 필요하다고 제안하고 있다. 또한 모델링 기법이 실질적인 적용에 있어 그 능력을 최대한 발휘하기 위해서는 제 5세대 시스템들이 요구되고 있다. 제 5세대 시스템들은 다음 절에 언급할 요소들을 포함한 물정보학(hydroinformatics) 기반의 시스템들이다. 제 4세대 및 제 5세대 물리적인 기반의 분포형 수문 모델링 시스템은 Refsgaard (1996)가 자세히 설명하고 있다. 현재로서는 단지 몇 개의 제 4세대 분포형 수문 모델링 시스템만이 존재하고 있으며, 제 5세대 시스템들은 아직 연구단계에 있다. 수리학 분야에서는 이미 2000여 개 이상의 기관에서 제 4세대 시스템들을 활용하고 있는 경험으로 미루어 볼 때, 수문분야에서도 미래의 전망은 밝다고 할 수 있다.

4.3 미래 물정보학 (hydroinformatics)의 역할

보다 많은 전문가 및 관리자들이 실질적인 적용을 위하여 기존 및 과학적으로 새롭게 진보된 모델들을 제대로 활용할 수 있기 위해서는 수문모델 코드를 다음과 같은 내용들을 포함한 물정보학 기술과 통합하는 것이 필요하다(Babovic과 Minns, 1996).

- ① 개방형 모델링 시스템을 위한 표준 (standards for open modelling systems): 모델링 기술이 보다 폭넓게 적용되기 위해서는 사용자 인터페이스 및 모델 적용 인터페이스에 대한 표준도구의 개발이 필수적이다. 이는 특정한 목적을 위하여 적용할 경우에 여러 모델링 시스템들을 쉽게 결합하여 사용할 수 있도록 해 줄 것이다. 예를 들어, 각각 다른 기관에서 개발된 수문모델, 토양침식모델, 하천유사운송모델들이 프로그램 코드의 수정없이 결합될 수 있는 것이다.

표준도구는 절대적으로 상호호환이 가능하여야 하며, 다양한 종류의 데이터베이스, 특히 GIS와 같은 일반 소프트웨어들을 쉽게 수용할 수 있어야 한다.

- ② 논리적인 모델링 기술 (logical modeling techniques): 이미 수리분야에서 진전을 이룬 논리적 모델링 기법의 적용 즉, 수치 및 논리 프로그래밍의 결합이 수문의 지식공학적 측면에서 수용되어야만 한다.
- ③ 지식기반 시스템 (knowledge base systems): 수자원 관리의 다양한 분야를 위한 지식기반 시스템들의 적용이 이와 동시에 수반될 수 있어야 한다. 따라서 지식공학적 컴퓨터 도구를 이용한 지식기반 기술이 필요하다.
- ④ 시스템 보정 (systematic calibration): 가용 자료와 수문학자들의 경험을 활용하여 해당목적에 맞게 수문모델들을 보정하는 방법들을 개발하여야 한다. 이는 필수적으로 역추적 기법과 함께 다양한 측면에서 전문가 시스템을 도입하여 결합하는 것을 포함하고 있다.
- ⑤ 진보된 모델과 통합한 최적화 기법 (optimization methods integrated with advanced models): 진보된 모델 그리고 기 언급한 물정보학 도구들과 통합한 최적화 기법의 적용은 이미 수리분야에서 적용되고 있듯이 수문분야에서도 적극 개발되어야 할 것이다.
- ⑥ 결정방법 (decision methods): 수자원의 제어와 관리를 목적으로 결정방법의 적용 및 수문모

델링 시스템과의 통합이 개발되어야 한다. 이러한 단계에서는 수문모델이 새로운 유형의 체계 및 계열 (객체지향)과 통합될 것이다 (타 분야에서는 활발하게 구축되고 있음).

상기의 연구활동에 의한 궁극적인 결과물은 가상 수문환경 (virtual hydrological environment)이라 할 수 있는 제 5세대 모델링 환경이다. 이는 다음과 같은 강력한 특징을 가지는 복합적인 환경을 이루게 될 것이다:

- 사용자가 필요로 하는 특정 자료를 제공하는 가상 보편화된 데이터베이스와 GIS와의 인터페이스 표준화,
- 대체 및 호환 가능한 수문모델링 시스템의 자유로운 선택,
- 그래픽 인터페이스,
- 모델 보정, 최적화, 의사결정 등을 위한 각종 도구,
- 타 분야의 전문가 (농학자, 생태학자, 기상학자 등)들의 효율적이며 책임있는 통합 수문자료 및 지식자원 접근 및 활용.

ICWE-Dublin과 UNCED-Rio회의에서 채택된 선언문은 과거의 지역적/편협적 접근방법을 지양하고 보다 총체적인 수자원 관리전략을 추구하고 있다. 세계은행의 신정책에서 Matthews (1994)가 제안한 바와 같이, Dublin과 Rio선언을 실현하기 위해서는 물정보학의 활용에 대한 필요성이 대두되고 있다. 🌐

(참고 문헌)

Abbott, M.B. (1972) The use of digital computers in hydrology. In Teaching Aids in Hydrology, Technical papers in Hydrology 11, UNESCO, LC No. 72-87901.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a) An Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1 : History and Philosophy of a Physically-based, Distributed Modelling System. Journal of Hydrology, 87, 45-59.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986b) An Introduction to the European Hydrological System

- Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2 : Structure of a Physically-based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- Abbott, M.B., Babovic, V., Arndisen, L.K., Baretta, J. and Dorge, J. (1994) Modelling ecosystems with intelligent agents. In Verwey, A., Minns, A., Babovic V. and Maksimovic C. (Eds) *Proceedings, Hydroinformatics 94*. Balkema, Rotterdams, 179-186.
- Adams, W.M. (1986) *Nature's Place : Conservation Sites and Countryside Change*. Allen & Unwin, London.
- BMA (1986) *Bangkok Flood Management Model - Feasibility Study*. Report prepared by Acres International Ltd and Asian Institute of Technology for Bangkok Metropolitan Administration.
- Bowles, D.S. and O Connel, P.E. (Eds) (1988) *Recent Advances in the Modelling of Hydrologic Systems*. Proceedings from the NATO ASI, Sintra, Portugal, Kluwer Academic Publishers.
- Carrier, J. (1991) The Colorado. A river drained dry. *National Geographic*, June 1991, 4-35.
- Clarke, R. (1991) *Water: The International Crises*, Earthscan Publications Ltd, London.
- Danida (1988) *Environmental issues in water resources management*. Danish Ministry of Foreign Affairs, Copenhagen.
- De Coursey, D.G. (Ed) (1988): *Proceedings of the International Symposium on Water Quality Modelling of Agricultural Non-Point Sources*. Utah, June 19-23. U.S. Department of Agriculture. Vol 1, 422 pages. Vol 2, 459 pages.
- Dugan, P. (1993) *Wetlands in Danger*. Mitchell Beazley. London.
- Evans, R. (1981) Potential soil and crop losses by soil erosion. *Proceedings, SAWMA Conference on Soil and Crop Loss: Development in erosion control*. National Agricultural Centre, Stoneleigh.
- FAO (1991) *An international action programme on water and sustainable agricultural development. A strategy for the implementation of the Mar del Plata Action Plan for the 1990s*. UN Food and Agricultural Organisation.
- Feddes, R.A., Kabat, P., van Bakel, P.J.T., Bronswijk, J.J.B. and Halbertsma, J. (1988) *Modelling Soil Water Dynamics in the Unsaturated Zone - State of the Art*. *Journal of Hydrology*, 100, 69-112.
- Freeze, R.A. and Harlan, R.L. (1969) Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrological response model. *Journal of Hydrology*, 9, 237-258.
- ICWE (1992) *The Dublin Statement and report of the conference. International Conference on Water and the Environment : Development issues for the 21st century*. 26-31 January 1992, Dublin, Ireland.
- Klemes, V. (1988) A hydrological perspective. *Journal of Hydrology*, 100, 3-28.
- Lohani, V.k., J.C. Refsgaard, T. Clausen, M. Erlich and B. Storm (1993) Application of the SHE for irrigation command area studies in India. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(1), 34-49.
- Matthews, G.J. (1994) *Hydroinformatics and the World Bank*. In Verwey, A., Minns, A., Babovic V. and Maksimovic C. (Eds) *Proceedings, Hydroinformatics 94*. Balkema, Rotterdams.
- Morgan, R.P.C, J.N. Quinton and R.J. Rickson (1992) *EUROSEM Documentation Manual, Version 1*. Silsoe college, UK.
- Rodda, J.C. (1995) Whither world water? *Water Resources Bulletin*, 31 (1), 1-7.
- SAST (1992) *Research and technological development for the supply and use of freshwater resources. Report on monitoring and modelling. Expert report prepared by I Kruger Consult AS and Danish Hydraulic Institute for the Monitor-SAST Project No 6*. Commission of the European Communities.
- Stanbury, J. (Ed) (1986) *Proceedings of the International Conference on Water Quality of the*

■ 학술기사

수자원관리에서 분포형 수문모델링의 역할

- Inland natural Environment. Bournemouth, England, June 10-13. BHRA.
- Tiner, R.W. (1984) Wetlands of the United States : Current status and future trends. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington D.C.
- WHO(1991) Water quality, Progress in implementing the Mar del Plata Action Plan and a strategy for the 1990s. Report sponsored by UN/GAPD/DIESA, UN/DTCD, UNDP, UNEP and WHO and prepared by GEMS MARC and WHO. World Health Organization.
- World Bank(1993) Water resources management. A World Bank policy paper. Washington D.C.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1965) Predicting rainfall erosion losses form cropland East of the Rocky Mountains. Agricultural Handbook No 282. Agricultural Research Service, USDA, Purdue Agricultural Experimental Station.