

미국 지질조사소(US Geological Survey)의 향후 10년 연구 방향



김 규 범 |

한국수자원공사 차장(미국지질조사소)
gyoobumkim@usgs.gov, gbkim@kwater.or.kr

1. 서 언

지금 세계는 기후 변화에 따른 생태계의 변화, 수 자원의 고갈, 각종 재해의 발생 등에 직면하면서 선진국들은 이에 대처하기 위한 발 빠른 행보를 하고 있으며, 각종 연구 투자와 미래 정책을 제시하고 있다. 본인은 2007년에 미국 지질조사소 미시간 사무소(Michigan Water Science Center, US Geological Survey)에서 지하수와 지표수의 연계 운영관리에 대한 연구를 수행하면서 수자원 조사 연구 분야의 세계 최고 권위 기관인 미국 지질조사소의 향후 10년 연구 방향 보고서를 접하고 그 내용을 소개하고자 한다. 본 원고의 일부는 2007년 8월에 발간된 “미국지질조사소의 2017 연구 방향 보고서 (Facing Tomorrow’s Challenges-U.S. Geological Survey Science in the Decade 2007-2017)(USDOI and USGS, 2007)”을 참고하였다. 본인이 임의대로 연구 방향 보고서라고 명명한 점은 머지않아 세부 전략이 정의된 25~30 페이지 분량의 “USGS Science Strategy” 발간이 예정이라는 점을 감안하였다.

1879년 3월 3일 설립되어 127년의 역사를 갖고 있는 미국 지질조사소는 “자연과학 분야에서의 세계의 리더가 된다”는 비전을 갖고 약 10,000명의 과학자

가 400개 이상의 지역에서 대기 및 기후, 지구 특성, 생태환경, 지형, 수문, 자연 재해, 자연 자원, 해양, 운석, 동식물, 수자원 등 다양한 분야에서 연구를 수행하는 미내무성(Department of Interior) 산하 기관이다.

미국 지질조사소는 1990년대 초에 환경변화에 대응하기 위한 장기 전략의 필요성을 느끼고 1996년에 21세기의 환경 변화에 대응하기 위한 전략을 제시한 바 있다. 10년이 지난 지금의 도전과 변화는 과거와 완전히 달라졌으며 이에 대응하기 위하여 향후 10년에 대한 새로운 연구 전략을 수립하게 되었다. 특히 기후 변화가 현실로 다가서는 시점에서 보다 환경 생태적인 측면이 강조된 새로운 연구 전략이 필요하게 되었으며, 전략 분야, 고객관리 분야 및 풍부한 연구 경험을 갖춘 전문가로 구성된 과학전략팀(Science Strategy Team, SST)이 구성되어 향후 국가 운영에 있어 과학적 능력을 최대한 발휘할 수 있도록 기본 연구 방향을 작성하게 된 것이다. 이 계획은 최상위 과학 전략으로서 몇몇 과학자의 아이디어에서 제안된 것이 아니라, 수십년간 계속된 지속적인 기초 연구와 기초 전략 자료에 근거하여 집대성되었으며 그 동안의 관측 결과로부터 도출된 각종 연구 자료를 바탕으로 향후 방향을 구체화한 것이다. 또한, 본 전략 수립을 위하여 미국 지질조사소 소속의 생물, 지형, 지질, 수자원, 정보화, 인사관리, 서부분부, 중부분부 및 동부분부의 부서장 및 재정 분야의 권위자들이 동참하였으며 특히 200명이 넘는 각 본부 및 현장의 전문가들이 계획에 대한 의견을 제시하고 검토하는데 참여하였다.

본 전략의 서두에서 밝히고 있는 점을 하나 소개하면, 국내의 정책 입안 환경과 사투 다른 느낌을 갖게 하는 것으로서 독자들도 비슷한 생각을 할 것으로 생

각된다. 그 동안 미국 지질조사소는 미국 및 전 세계에 대한 연구 활동 뿐 아니라 장기 관측 및 데이터 수집을 끊임없이 지속해 왔으며 특히 기초 관측에 대한 기본적인 방침은 바뀌지 않음을 천명하고 있고 본 전략에서 이를 현재 미국 지질조사소의 근간이 되고 있음을 분명히 하고 있다. 즉 다음 4개 그룹에 대한 기초적인 관측 및 연구는 과거, 현재 및 미래를 통하여 지속됨을 밝히고 있는데, 첫째, 자연 재해, 해안 침식, 화산 및 지진, 에너지 광물 자원 등에 대한 정보, 둘째, 지표수 및 지하수에 대한 수량과 수질 정보 및 홍수 자료, 셋째, 생물의 다양성 및 생태 환경 등에 대한 정보, 넷째, 지구 공간 정보, 지형정보, 위성 정보, 토지계획 및 관리에 대한 자료 등이 해당된다. 이는 과거 100년 이상 수행해 온 기초 자료 생성과 기초 분야 연구 과정에서 얻어진 자료, 기술력 및 연구 능력 등을 활용하여 세계 최고의 자연 환경 분야 연구기관으로 성장하였음을 보여주고 있고 향후에도 이에 대한 소홀함이 없을 것임을 밝히고 있는 것이다. 또한, 이와 같은 기초 연구와 장기 관측 자료의 기반 위에서 국가가 요구하는, 또는 국가의 정책에 부합하는 다양한 연구 결과를 제공해 왔으며 인간의 생활, 산업 발전 및 환경 보전에 기여해 온 것이다. 우리나라의 과학 연구 정책과 각종 정책 입안 시 기초 자료의 중요도에 대한 인식을 넘어 기초 관측의 장기 전략화 및 시행 등에 있어서 미국 지질조사소와 어떠한 차이가 있는지 생각해 볼 대목이다.

2. 지구 환경의 변화

2.1 기후의 변화

미국 지질조사소의 향후 10년 전략 변화에 결정적인 원인 제공자는 바로 기후 변화이다. 본 연구 방향의 핵심은 기후 변화에 대처하는 다양한 연구 방향을 제시한 것으로서 여러 분야의 연구들이 통합적으로 연계하여 시너지 효과를 발휘토록 전략을

구성하였다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 2007년 4차 평가 보고서에 의하면, 1750년 이후 인간의 활동에 의하여 지구 온난화는 명확해지고 있다고 밝히고 있다. 지구 공기와 해양 온도의 상승, 눈과 얼음의 광범위한 해빙, 해수면의 상승, 강우량의 변화, 해수 염도의 변화, 바람의 패턴 변화와 극한 기상의 발생 등이 관측되고 있다고 한다 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

지구상에서 환경 변화가 잘 나타나는 곳으로서 극지방인 알래스카를 이야기한다. 알래스카에서는 지구 온난화로 인하여 생물학적 및 물리적인 변화(지형 등)가 현실화되어 야생 생물, 인간, 식생 및 제반 기반구조물 등에 그 영향이 나타나고 있다. 과거 수십 년 동안 봄과 겨울 기간의 온도 상승은 현저히 나타나고 있으며 이로 인한 해빙기 하천의 유출량이 급격히 늘어나고 있다. 이러한 변화는 지표면으로부터 수서 생태 환경으로의 탄소와 영양분 이동에 변화를 가져왔으며, 현재의 물리적 변화의 상태(빠른 기후 환경 변화와 변화 범위의 확대 등)를 고려한다면 기존 관측 시스템이 지나치게 이격되어 있고 부적합한 것으로 결론 내릴 수 있다(Arctic Climate Impact Assessment, 2004). 또한, 많은 숲이 새롭게 형성되고 있음에도 불구하고 토양의 온도 상승으로 인하여 토양 유기물로부터 온실가스(이산화탄소와 메탄 등)가 점점 더 많이 방출되고 있으며(Wickland et al., 2006; Striegl et al., 2005), 극지방에서의 곤충이 급증하고 삼림에서의 화재가 늘어나고 있다. 해양 빙하의 감소는 북극곰, 빙하 서식 바다표범 및 해양 조류의 서식 환경을 파괴하고 있으며 인간에게 영향을 주는 새로운 질병(West Nile virus, avian influenza 등)을 발생시키고 있다. 또한, 극지방의 기후 변화는 기반시설의 변화를 야기하는데, 해안선과 부속 시설물은 태풍과 해안 침식에 노출되고 해빙되는 땅은 교통시설, 빌딩, 송수관 시설 등을 파괴하고 있다. 알래스카 일부 툰드라 지방에서의 차량 이동 가능한 기간이 연간

200일에서 100일로 줄었으며 이는 원유/가스 이동 및 삼림 산업에 영향을 미치고 있다(Hinzman et al., 2005). 미국 지질조사소는 극지방에서의 토양 온도 상승에 따른 탄소 방출에 대한 자료를 토대로 캐나다, 알래스카, 시베리아 지방의 토양 온난화로부터의 가스 방출량이 화석 연료 소모로부터 방출되는 양과 비슷할 것으로 내다보고 있어 추가적인 관측과 연구가 필요한 것으로 판단하고 있다.

미국내의 수문기상학적 관측 자료의 분석에 의하면, 지난 50년간 지속적인 온난화가 있어 왔음을 보여준다. 미국 서부 지역의 경우, 강설의 양이 줄고 강우로 바뀌었으며 봄의 해빙 시기가 빨라지고 봄 기간의 눈이 쌓인 평야의 면적이 줄었으며 식생의 신록 현상이 빨라지고 있다(Knowles et al., 2006; Stewart et al., 2005; Mote, 2003; Cayan et al., 2001). 미 북동부 지역에서도 유사한 수문기상학적 특성이 나타나는데, 100년 전에 비하여 눈의 해빙 시기가 1~2주 정도 빨라졌다(Hodgkins and Dudley, 2006; Huntington and others, 2004). 이상의 기후 변화와 함께, 자연 재해의 증가 및 질병과 오염의 확대 등이 주요 환경 변화 인자로 고려되고 있다. 이와 같은 증거들은 장기적인 관측과 분석 연구를 통하여 얻어진 자료로서 미국 지질조사소가 자연과학 분야의 최고로서의 자리매김하는데 기초 관측 및 자료 수집이 중요함을 다시 한 번 알 수 있다.

2.2 자연 재해의 증가

2005년 8월 29일 허리케인 카트리나(Katrina)에 의하여 멕시코만 일대 도시 기능의 장기간 마비, 생태환경 변화, 사회 구조의 파괴 등 피해를 겪으면서 자연 재해의 위험성을 다시 한 번 인식하게 되었다. 뉴올리언즈의 위성 영상 분석 결과에 의하면 토지 형태의 변화, 퇴적물의 증가, 운하의 기능 마비, 빌딩의 침수, 교통 수단의 악화 등의 변화가 장기간 지속되었다. 또한, 남부 캘리포니아 지역의 경우 과거 수십년 동안 자연 재해의 증가가 계속되었으며

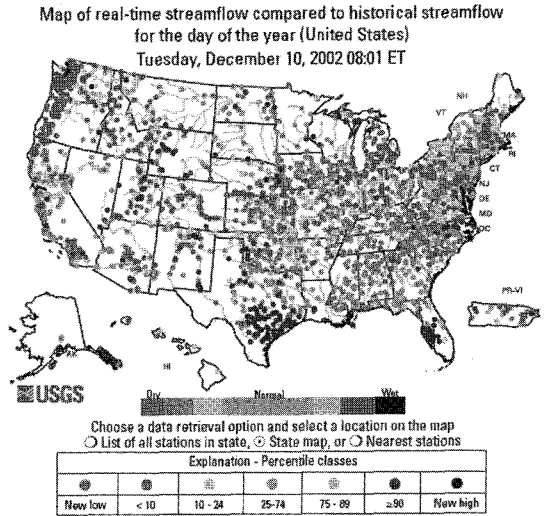


Fig. 1. 미국의 Water Watch를 통한 수문자료 제공 (<http://water.usgs.gov/waterwatch>)

남부 8개 도시(County)의 연간 자연 재해에 의한 손실이 30억불에 이르는 것으로 추정되고 있다. 지진, 홍수, 화재, 사태, 쓰나미 등은 남부 캘리포니아 지역의 인간 생활과 재산에 위협적인 존재로 자리 잡고 있다.

특히, 미국 지질조사소는 자연 재해에 대한 대비와 연구를 지속해 왔으며, 대표적인 사례로서 전 세계와 연계한 관측기기(지진, 화산, 홍수, 사태 등) 설치 운영, 미국 내 169개 활화산을 관측하기 위한 국가 조기 화산 경보 시스템(National Volcano Early Warning System; NVEWS) 운영, 미국내 지진활동이 활발한 14개 지역에 대하여 지진을 인식하고 평가하는 국가지진시스템(Advanced National Seismic System)을 구축하여 실시간 지진도(Shake map)를 제공하고 있으며, 수자원 분야에서도 총 7,000개의 유량지점으로부터 약 4,000개의 실시간 하천유량 정보를 Water Watch 홈페이지를 통하여 제공하고 있다. 이와 같이 그 동안의 자연재해에 대비한 노력에도 불구하고 대규모 삼림 화재, 지진에 의한 쓰나미, 허리케인 등의 발생이 증가하고 있어 인간 활동의 보장을 위한 대책이 필요 시되고 있다.

2.3 질병 및 오염에 대한 대비

생태계의 변화는 질병의 확산을 야기시키고 있다. 대표적인 사례로서 2006년 1월부터 7월까지 West Nile Virus(1937년 우간다 여성에서 첫 감염, 중추 신경 마비에 의한 사망 등 야기) 감염 여부에 대한 조류 분포 현황을 파악한 결과 미국 중부와 서남부의 여러 지역에서 양성 반응을 보이는 것으로 나타났는데, 이는 모기 등의 2차 감염을 통하여 인간에게 피해를 줄 수 있음을 의미한다. 이와 같은 West Nile Virus 및 Avian influenza 등 동물학적 기원의 질병과 물고기내의 수은, 물에 함유된 비소, 석면 등은 더 이상 독립적인 문제로 고려될 수 없으며, 인간에게 전파되기 전에 야생동물에서 나타나는 현상에 대한 관측이 점차 확대 요구되고 있다.

미국 지질조사소에서 1999년부터 2000년까지 30개 주 139개 하천 지점에서 채취한 물 시료 분석 결과에 의하면, 산업 활동, 주거지, 농업활동 등에 의하여 야기된 다양한 종류의 화학물질(예를 들면, 의약품 성분, 호르몬 성분, 살충제, 방화제 등)이 저 농도로 포함되어 있음이 밝혀졌으며 특히 한가지 성분의 경우에는 전체 시료의 80%에서 감지되었고 50% 정도의 시료는 7개 이상의 항목을 포함하는 것으로 나타났다. 또한, 미국 과학 아카데미에 의하면 매년 60,000명의 어린이가 수은 노출에 의한 신경학적 결핍으로 태어나고 있는 것으로 보도되고 있는 등 환경 변화에 따른 질병과 오염이 줄어들지 않고 있다.

3. 주요 연구 방향

미국 지질조사소는 상기 기후 및 생태 환경 변화에 대비하고 인간생활 및 하나뿐인 지구를 보호하기 위하여 다음과 같은 주요 연구 방향을 제시하고 있다.

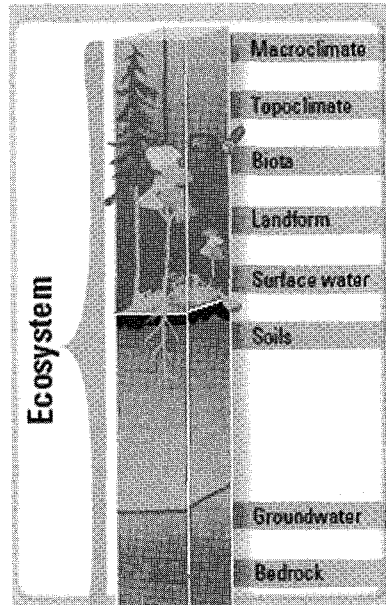


Fig. 2. 생태계의 구성 (생태계에 대한 정의는 물리적 환경에 작용하는 통합적인 유기물 계를 말한다. 유기물과 그 주변을 통한 에너지와 물질의 순환은 중요한 생태계 과정에 해당하며, 공간과 시간에 따른 유기물의 분포, 조성 및 발달 상태, 물리적 환경의 특성, 자연적 변화와 인간의 작용에 반응하는 방식 등은 생태계 과학의 핵심 요소이다.)

3.1 생태계의 이해와 변화에 대한 예측

미국 지질조사소의 향후 10년의 새로운 핵심 과제로서 지표, 담수, 해안 및 해저 등의 생태 환경에 대한 연구를 최우선 주제로 선정하였다. 이는 위에서도 언급한 바와 같이 지구환경의 변화에 따라 인간 활동, 자원, 산업 등과 분리될 수 없는 생태계의 중요성이 부각되는 시점에서 선택된 전략이라 할 수 있다. 인간의 필요에 따라 지구를 이용함에 있어서 생태계에 대한 조사, 도면화, 관측, 모델링 등은 지구를 건전하고 균형있게 사용하게 한다. 즉, 생태계는 모든 가능한 방법들을 이용하여 종합적으로 조사, 연구되어야 하는 통합 전략 대상이 되는 것이다. 다음 10년 동안 미국 지질조사소는 타 기관과 연계하여 생태계 내에 있는 유기물에 대한 분포, 상호 관계, 상태, 보

전의 필요성 등에 대한 조사를 수행하고 지표의 변화, 기후 변화 및 기타 영향 인자로부터 발생하는 생물 다양성의 변화를 평가 예측하는데 연구의 초점을 둘 전망이다. 또한, 생태계의 기능과 역할, 패턴과 진행 과정 등에 대한 연구를 통하여 미국내 생태계 표준화 지도를 작성할 계획이며 생태계의 상태 및 추세에 대한 자료 축적 및 분석 보고서를 주기적이고 지속적으로 작성할 계획이다. 생태계에 대한 연구는 지역 규모와 국가 규모로 구분하여 추진하되, 지역규모에서는 생태계에 대한 기본적인 연구(생태계의 기능, 생태 환경의 지시자, 생태계의 변화 요인 및 과정, 생태계 변화의 영향, 의사결정 기법의 제시 등)를 수행하며, 국가 규모에서는 국가 생태계 모니터링 시스템을 구축할 목표로 다양한 분석 평가 및 예측 기법을 개발하여 미래 불확실성에 대처토록 하고 있다.

미국 지질조사소의 생태계 연구에 대한 주제를 요약하면 다음과 같다.

- ① 생태계의 작용과 변화에 대한 연구 : 생태계를 구성하는 생물과 비생물 성분 간의 관계에 대한 규명, 자연적 및 인간에 의하여 발생하는 생태계 변화 범위에 대한 연구, 생물지구화학적 특성 및 토양 생태에 대한 연구, 생물 다양성 보존에 필요한 요소 연구, 생태와 물의 관계 연구, 생태계의 변화 과정에 대한 연구, 외래 생물종의 도입과 환경 피해 최소화에 대한 연구, 시공간적 조건에 따라 다양한 스트레스 인자가 생태계 구성에 미치는 영향 연구, 토지이용/기후변화/오염/외래종/질병 등 다양한 스트레스 인자에 대한 국내 종 및 생태 환경의 취약성 연구 등
- ② 국가 공간 생태 모형(National Geospatial Ecosystem Model)의 개발을 통하여 생물학적 성분과 비생물학적 성분(자연지리, 암석, 수리 특성, 기후 등)의 관계를 밝힘으로써 국가 관리 및 인간 활동의 의사 결정에 기여

- ③ 생태계 상태 및 추세에 대한 국가 관측체계 구축 : 토지변화, 기후, 오염원 및 기타 생태계에 영향을 미치는 인자에 대한 관측으로서 a)장기적이고 대표적인 관측지점, b)공간적으로 광범위한 구역, c)점(point) 관측 결과의 확대 해석을 통한 광역적 특성 파악 가능 지역 등 3개 구역에 대한 국가 생태 환경 관측망 구성
- ④ 생태계의 평가, 예측, 복원 및 보호를 위한 관리 자용 기법 개발
- ⑤ 생태계에 대하여 지속적으로 미치는 오염 위협에 대한 평가, 시험 및 측정할 수 있는 생태독물학적(生態毒物學的) 방법과 기술의 개발
- ⑥ 인간의 건강과 복지에 대한 의사결정에 요구되는 생태계 특성 및 과정에 대한 보다 우수한 평가 기법의 개발

한편, 본 보고서에서는 콜로라도강의 Lake Powell(Glen Canyon Dam), 그랜드 캐년 및 Lake Mead(Hoover Dam)을 연계하는 통합 생태계 관리에 대한 그 동안의 사례로서 통합 모델 구축 및 실제 적용에 대한 연구 내용을 소개하고 있으며, 이를 통하여 미국 지질조사소의 향후 생태계 통합 연구에 대한 가능성과 자신감을 피력하는 것 같다.

3.2 기후의 다양성과 변화에 대한 연구

앞에서 언급한 바와 같이, 미국 지질조사소 연구 방향의 전환을 야기시킨 핵심적인 인자는 기후 변화이다. 따라서, 기후 분야와 관련된 연구를 핵심 과제로 선정하고 있는데 이는 지난 수십 년 동안 기후 분야의 연구를 수행하면서 구축된 관측 기술, 연구 능력, 통합 기능, 모델링 등을 십분 발휘할 수 있다는 강점을 기반으로 하고 있다. 기후 분야 연구에 있어서 다음 3개의 연구 방향을 설정하고 있다.

① 관측 분야 : 미국 지질조사소는 새로운 생물학적 평가 기법을 개발하여 기후 변화에 따른 생태계내에서의 종의 다양성, 산출성 및 물리적 변수 등에 적용할 계획인데, 이를 위하여 토지 이용 및 피복 특성에 대한 변화 정보, 수자원 및 지표면의 변화, 생물 종, 생태환경의 기능 변화 등에 대하여 지속적으로 자료를 수집하여 국가 기후변화 반응연구 프로그램(National Climate Change Response Research Program)에 통합 적용할 계획이다. 특히, 타 기관이나 과학자와의 협력을 통하여 다기관간 관측 네트워크에 대한 Clearing House의 기능을 수행함으로써 공공기관 및 관리자에게 필요한 정보를 제공하고 자료의 분석을 통하여 지구 생태의 변화에 대한 해답을 제공할 것이다.

② 연구 분야 : 지구 기후의 향후 변화를 예측하고 기후와 물, 토지, 환경 및 사회 등과의 관련성을 이해하는데 연구의 목적을 두고 있는데 구체적으로 보면, 극지방과 고지대 환경에서의 탄소의 순환에 대한 연구, 기타 생태적 화학 성분인 질소와 탄소의 상호 관계에 대한 연구, 강우와 온도의 변화에 따른 땅과 지표면의 상호 작용 및 수문계에 미치는 효과 연구 등이 포함된다.

수자원분야 연구에 있어서는 홍수와 가뭄에 대한 강도, 빈도, 지속기간 등의 수문기상학적 연구를 지속하여 수질과의 상관성을 규명해 나가고, 고기후의 해석과 기후에 대한 생태학적, 동물학적 및 물리적 반응을 규명하여 자연적인 변화 특성을 정의함으로써 미래의 지구 변화를 해석하는데 활용토록 하고 있다.

한편, 기후 변화는 21세기 중반까지 화석 연료에 의한 대기 중 이산화탄소의 양이 지속 증가한다는 가정에 의한 것으로서, 이를 방지하기 위한 하나의 대책으로써 이산화탄소의 채취 및 저장에 대한 연구를 구상하고 있다. 저장소로서 원유/가스 필드, 탄광, 해저층 등을 고려하고 있으나 여러 가지 지질학적/지구

화학적 불확실성을 내포하고 있기 때문에 이에 대한 보다 적극적인 연구의 필요성을 역설하고 있다.

③ 평가 분야 : 정부 관리자들이 토지, 물, 생물 및 생태 자원을 관리하는데 필요한 예측 기법과 시뮬레이션 모델 등을 개발할 계획이며, 이 기술은 여러 분야의 다양한 입력 자료와 모형을 필요로 하는 것으로서 생태 동력학과 지표 및 식생 변화과정에 대한 통합된 연구를 통하여 가능할 것으로 보고 있다.

3.3 미래의 에너지와 광물자원에 대한 연구

미래 에너지와 광물의 유용성에 대하여 2가지 이슈를 제기하고 있는데 첫째는 세계화(Globalization)이며 두번째는 환경의 효과(Environmental effect)를 말한다. 세계화는 전 세계의 자원과 에너지의 자유로운 이동을 확대시켰으며 에너지 자원의 경쟁적인 개발과 공급을 발생시키고 있는데, 이로 인하여 자원의 희귀성, 과다 소모 등이 발생되고 대체 자원의 개발이라는 또 다른 과제를 유발하게 되었다. 환경의 효과는 에너지 소비로 인한 환경오염을 의미하는 것으로서 유류 누출, 폐광산, 댐 파괴, 산성광산폐수 배출, 산성비, 대기 중 이산화탄소 증가 등을 말한다.

다음 10년 동안의 에너지와 광물자원에 대한 4가지 전략 영역을 제시하고 있다.

① 미래를 위한 자연자원의 보호

에너지와 광물자원의 탐사, 개발 및 사용의 환경적 효과에 대한 분석을 포함하는 에너지와 광물 평가에 대한 다분야의 접근법을 개발하고, 탄화수소 및 비탄화수소 기반의 에너지자원에 대한 지속적인 평가 연구를 수행하고 산업과 방위 분야에 있어서 희귀광물 및 희귀원소의 유용성 등을 규명해 나갈 것이다. 또한, 자원의 흐름과 산출 및 이용에 대한 장기간의 추세 모니터링도 지속적으로 수행한다.

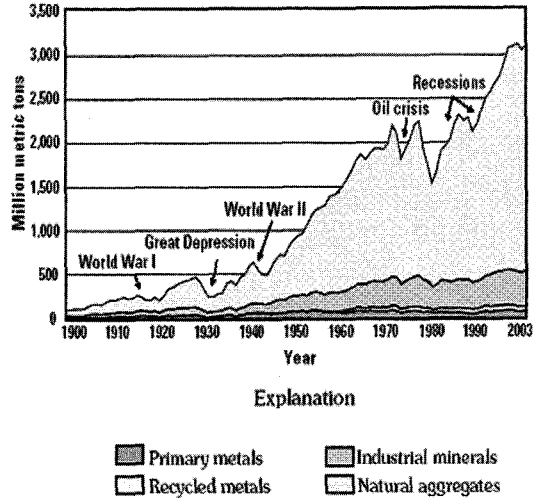
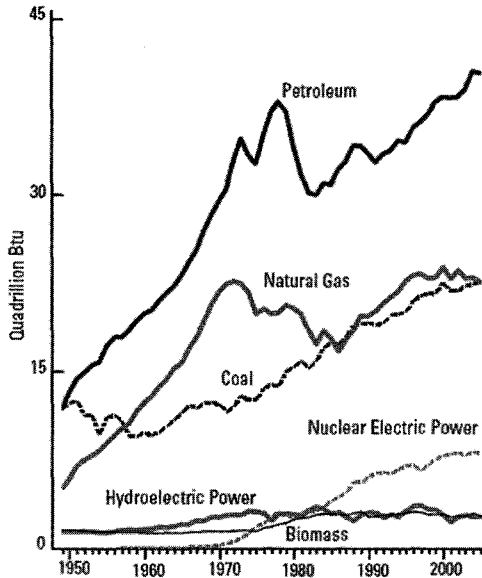


Fig. 3. 미국 에너지 소비 및 광물자원 소비 추세

② 환경적 건강성

이는 에너지와 광물 자원의 순환체계에 대한 명확한 이해를 필요로 하는 것으로서, 에너지의 소모 및 폐광물의 처리 등이 지형, 수자원, 기후, 생태, 인간 건강 등에 어떻게 영향을 미치는 가를 규명하는 것이다. 이를 위해서는, 생태 환경 내에서의 에너지와 광물자원의 이용, 순환 등에 대한 평가 체계가 정립되어야 하며 관측체계가 잘 운영되어야 한다. 또한, 국가가 보다 다양한 형태의 에너지 개발 및 소비 체계로 진입함에 따라 대체에너지의 평가 기법에 대한 지질학적, 생물학적, 수문학적인 이해가 정립되어 지속 발전되어야 한다.

③ 국가 경제의 활력

에너지와 광물 자원은 국가 경제의 기반이 되는 것으로서 탄소 순환에 대한 연구 등 에너지 자원의 순환 체계에 대한 분석을 실시하고 그 경제적 효과에 대한 연구를 수행하는 것으로서 이는 무엇보다도 타 기관과의 협조 체계를 필요로 하는 것으로 정의하고 있다.

④ 국유 토지의 관리

미국 지질조사소는 연방 토지를 관리하고 있는 미내무성(Department of Interior) 산하 기관으로서 연방 부지 내에서의 에너지와 광물자원의 효율적 개발을 위해서는 생태 기반의 관리가 요구된다. 특히, 해안지역은 휴양, 운송, 임대, 보전 및 경제 성장에 대한 욕구에 따라 생태 기반의 관리 기법이 더욱 요구되며, 해저 광물자원의 개발이 본격화되면 해안지역에 대한 더욱 효과적인 관리 기법이 필요하다.

3.4 자연재해, 위험 및 복원성 평가 프로그램

21세기 자연 재해는 토지 이용, 인간의 건강, 자연 자원 등과 복합적으로 밀접한 관계를 갖고 있는데, 자연 재해에 대한 관측, 예측, 평가 및 경고 등의 업무를 미국 지질조사소의 주요 기능으로 설정하고 지속해 나갈 계획이다. 또한, 생태계와의 관계 규명을 전제로 재해와 관련된 지구 운동, 수문학, 생물학적 위험성에 대한 평가가 주요 연구 범위로 설정되어 있으며, 최신 정보 기술(GIS)과 인터넷 등을 활용한 재해 의사결정 시스템 구축을 도모하고 있다. 자연재해

분야의 연구 분야로 5개를 설정하고 있다.

- ① 강력한 관측 체계의 구축 : 자연 재해 분야의 연구와 재해 대책을 위해서는 강력한 관측체계의 구축이 필수적이므로 다음 분야에 대한 투자를 우선시 하고 있다. 26개 지진 위험 지역에 대한 관측체계의 정비 및 최신화, 169개 화산의 조기 경보 시스템 구축, 홍수와 관련된 국가하천정보 프로그램(National Streamflow Information Program: NSIP)을 통한 미국지질조사소 하천 유량 관측체계의 구축, 해안지역 해수면 상승과 허리케인을 평가하기 위한 습지표면 측정망(Marsh Surface Elevation Table Network)의 확장, 재해와 관련된 지표면 및 해안의 변화를 평가하는 신기술의 개발 등이 해당된다.
- ② 망 통신에 대한 기술 개발 : 자연 재해의 신속한 인지 및 전달 등을 위한 최신 통신기술의 개발과 접목을 목표로 설정하고 있다. 예를 들면, 지진 분야에서의 통신수단인 PAGER(Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response)은 전 세계적인 지진 네트워크를 활용하여 관련 기관 및 정부 등에 핸드폰, 이메일, 인터넷 등 다양한 수단으로 지진의 위치, 규모, 심도 등의 정보를 제공하며 인간, 사회 및 구조물 등에 대한 지진 피해의 예상 규모 등 보다 구체적인 정보를 제공하게 된다.
- ③ 위해의 특성화 및 평가 : 2017년까지 여러 기관과의 협의를 통하여 도시지역 재해 피해도를 확대 작성하기 위한 다양한 기술을 개발하며 재해 평가 결과의 실용성과 유용성을 높여 나갈 것이다.
- ④ 예측 기술 : 재해의 발생, 분포, 시기, 강도, 위험의 정도, 인간 활동에의 영향 등에 대한 다양한 연구와 이해를 통하여 정확한 예측이 가능할

것으로 보고 있고 타 기관에서 수행하는 다양한 접근법/연구와 상호 연계함으로써 미래의 불확실성을 해소할 계획이다.

- ⑤ 파트너십(Partnership) : 재해 분야에 대해서 특히 타 기관과의 파트너십을 강조하고 있는데, 2017년까지 대학, 정부연구소 등과 협력을 지속하여 사회경제적 추세, 토지이용의 변화, 생태계 손실 및 기후 변화 등에 대한 도시와 생태계의 취약성을 관측하고 평가할 것이다. 또한, 미국지질조사소의 강점인 다양한 모델, 의사결정 기법, 데이터 포털 등을 활용하고 외부 기관과의 협력을 실시함으로써 보다 다양한 분석을 수행하고 잘 구축된 재해 프로그램을 통하여 여러 기관에서 수행한 결과 및 데이터를 통합, 해석할 수 있는 메커니즘을 제공하게 될 것이다.

3.5 인류 건강에 대한 환경과 야생 생물의 역할

의학 분야와의 협력은 미국 지질조사소의 또 다른 역할을 의미하는데 이는 인류 건강 분야의 연구 전략이 해당된다. 지구 환경이 변화함에 따라 새로운 질병과 오염원이 확산될 것에 대하여 국민에게 건강의 위험 요인으로 작용할 수 있는 환경 인자의 공간적 분포를 특성화하는 강력한 도구를 개발하여 국가에 제공할 계획이다. 이에는 생물학적, 수문학적, 지질학적 및 지형학적 인사들이 모두 포함된다. 현재 미국지질조사소는 국가 전체 규모, 지역 규모, 생물학, 유기물/무기물 등의 최고 수준의 다양한 데이터베이스를 갖고 있다 (Table 1). 이와 같은 통합된 데이터베이스를 외부의 파트너 기관에 제공하고 공유함으로써 인류 건강에 대한 발전을 도모하고 있다.

즉, 인류 건강에 대한 분야는 여러 전문 기관들이 참여하는 부분으로서 조사 연구 계획의 입안, 우선 순위의 결정, 공동 연구의 수행, 정보의 제공 등이 기관(전문가)간 동맹을 통하여 수행된다. 미국지질조사소의 경우 현재 다양한 기관(Center for Disease

Table 1. 미국지질조사소의 환경 건강 분야 데이터베이스 현황

구분	내용
NAWQA (National Water-Quality Assessment Program) data warehouse	- 7,600 지표수 지점, 8,100개 관정, 30,000개 농약 시료, 8,800개 휘발 유기물 시료, 미 전역 42개 구역에서 채취된 2,600개 퇴적물 및 수생 유기물 조직 시료 등
NBII Wild Disease Information Node	- 야생 및 인류 건강과 관련된 웹 자원의 통합 기능: 동물 질병 리스트, 각종 저널, 리포트, 도면 등 정보 보유 - Wildlife Health Monitoring Network는 여러 정부기관 및 비정부 기관간의 야생 질병 조사 자료의 연계 시스템으로서 현재 구축중임
Canary Database	- 동물에 대한 질병 관련 저널의 데이터베이스 (이는 인간 질병 재해의 파수군 역할을 함)
National Wildlife Health Center (NWHC) EPIZOO database	- 야생동물의 유행성 질병에 대한 25년간의 정보 보유
National Wildlife Health Center (NWHC) DIAGDATA database	- 혈청 시료에서부터 사체에 이르는 표본 기록 보유, 검시 보고서 (박테리아, 기생충, 바이러스, 독성물질 등을 포함함)
National Geochemical Survey database	- 미 전역내 289km ² 당 1개 이상의 밀도로 분석된 하천 퇴적물 및 토양의 시료 자료, 미국 및 알래스카 지역의 화성암류 및 비고결 퇴적물에 대한 시료 자료 등
BEST-LRMN (Biomonitoring of Environmental Status and Trends-large Rivers Monitoring Network)	- 물고기내의 오염 농도, 물고기 건강 지시인자 및 생물지표에 대한 정보 (Yukon, Columbia, Rio Grande, Mississippi 및 동남부 지역 유역 대상)
NASQAN (National Stream Quality Accounting Network)	- 국가 주요 하천에서의 퇴적물 및 화학물질의 농도 및 이동에 대한 자료
NADP/NTN (National Atmospheric Deposition Program/National Trends Networks)	- 강우량 관측 지점의 국가 네트워크로서 200개 이상 지점이 해당되며 타 기관 및 그룹과의 협력 네트워크임. 강우 내에 포함된 화학성분에 대한 자료 포함.
U.S. Coal Quality Database	- 10,000개 이상의 탄광 샘플에 대한 정밀 분석 자료

Control and Prevention, Armed Forces Institute of Pathology, Indian Health Service, EPA 등)과의 협력 체계를 갖고 있으며, 향후 연방 정부, 국방성, 국토안전부, 보건후생부 등과의 새로운 협력 관계도 구축할 계획이다.

미국 지질조사소의 재해에 대비한 빠른 대처능력 (특히 지진, 화산, 야생 질병 등의 분야)은 생태계, 환경, 인간건강 등의 분야에 있어서도 미국지질조사소의 집중 현상을 가져올 것으로 예상하고 있으며, 보다 다양한 분야에서의 풍부한 과학적 자료와 모델링 기법을 이용하여 지진, 홍수, 위험 오염인자, 병원균 등에 대한 보다 효율적 대처가 가능할 것으로 보고 있다. 또한, 환경 원인 질병에 대한 경로 연구가

보다 활발히 진행될 것이며, 이는 지구 기원(암석, 토양, 화산재, 먼지 등)과 물 기원(희귀원소, 병원체, 유기오염원 등) 및 생태학적 기원(야생 동물, 식물 등)의 인자들이 물 순환 과정, 생태계 과정, 음식물 순환 경로 등을 거쳐 인간에게 어떻게 작용하는 지에 대한 연구가 핵심 사항으로 포함된다.

마지막으로, 환경 건강 정보 시스템(Environmental health information system)의 구축을 통하여 GIS와 연계한 범 국가적인 건강 정보 데이터베이스를 구축하고 Clearing house로서의 역할을 수행하는 전략을 갖고 있다. 이는 동물학적 인자(질병의 경로와 야생생물의 이동 등을 포함한 것)에 대한 도면화 및 관측, 환경오염원과 병원균의 분포, 특성 및 기원 등

의 정보를 포함하며, 질병의 발생에서 인간으로의 전파에 관한 경로 해석 정보가 해당된다. 또한, 이들 자료 및 모델링 결과로부터 건강 위험도 지도를 생산하고 시공간적으로 이들 위험 인자가 인간 건강에 어떻게 영향을 미칠 것인지에 대한 모델링과 예측을 포함한다.

3.6 물 센서스

미국 지질조사소의 2017 연구 방향 보고서를 읽으면서, 주요 전략 사항중의 하나에 물이 여전히 포함되어 있다는 점은 물 관리를 담당하는 한 사람으로서 다행으로 생각되었다. 또 한 가지 의아하게 생각하였던 점은 물에 대한 조사 및 연구가 전략의 제목이 아니라 물 센서스라는 명칭으로 전략의 제목을 삼았다는 점으로서 기초 데이터의 수집과 분석에 대하여 얼마나 중요시 하는가를 상기시켜주는 대목이기도 하다.

위에서 언급한 5개 전략은 환경변화 시대에 맞추어 생태계와 인간을 중심으로 하는 통합 연구 전략으로의 지질, 지하수, 수문, 기상, 생태, 재해, 해양, 에너지, 경제 등의 모든 분야가 유기적으로 연계되는 연구 특성을 갖는 반면, 물 센서스는 물이라고 하는 단독 분야의 기초 데이터(물 자원 현황, 이용현황, 물의 가용성 등을 모두 포함하는 기초 데이터를 말함)에 대한 연구라는 점에서 물의 중요성을 다시 한 번 강조한 셈이다. 그러나, 물 센서스 항목 역시 앞에서 밝힌 생태계 연구 분야의 한 인자로 작용하는 만큼 미국의 향후 10년간의 연구 방향이 지구 시스템을 생각하는 통합 연구로 나가는 점은 명확하다 하겠다.

국가 연구 위원회(National Research Council, 2004)에 의하면, “미래에 대한 도전은 물이 주거, 산업, 농업 및 환경적 용도로 사용함에 있어 경쟁이 심화되고 있는 점을 고려할 때 인간과 생태계에 필요로 하는 적절한 양과 질의 물을 안전하게 지켜내는 것이다”라고 밝힌 바 있다. 이와 같은 양과 질이 보장되는 물 확보를 위하여 다음과 같은 6가지 물 센서스 방향을 기본 바탕으로 두고 있다.

- ① 자연 지리적 여건과 환경(생물 종 및 생태환경 기능의 유지와 관련된 물의 양과 질, 물리적 식 환경 조건 등이 포함됨) 등 생태계가 필요로 하는 것이 무엇인가에 대한 명확한 정의
- ② 생물상이 필요로 하는 물을 포함하여 모든 물의 이용량, 가용량, 수질의 상태와 추세 등 시계열 자료의 수집 저장 능력을 배가시키는 작업
- ③ 미국 내 지표 피복 특성과 토지이용의 연속적 변화 특성에 대하여 명확히 정의하고 도면화된 결과를 지속적으로 공표함으로써, 지표 피복과 토지이용이 수질과 수량 및 실제 이용에 어떻게 관련이 있는지를 잘 이해할 수 있도록 함. 뿐만 아니라, 기후 자료, 물이용 자료, 수문자료 등의 추가 시계열 자료를 사용하여 이들 모든 인자의 변화 특성이 수자원의 가용성과 수질에 어떻게 영향을 미치는지를 규명토록 함
- ④ 대수층과 유역의 물 보유 능력 및 저류성의 변화 등과 관련하여 유역 특성, 지질 및 지구화학적 골격 등에 대하여 보다 명확히 정의함
- ⑤ 기존의 지하수 모델과 유역 모델을 재정의하고 보다 복잡하고 실제적인 환경 인자를 고려할 수 있는 신 모델을 개발함(물순환 과정 예측 및 의사결정 지원 등)
- ⑥ 미국내 물 센서스의 기획과 실행을 위한 지역, 주 및 연방 기관 등과의 파트너십을 강화함

물 센서스의 중요성에 대하여 국가 과학기술 협의회(National Science and Technology Council, 2004)에서 언급한 자료를 소개하고 있는데, 이는 “Knowing how much water is available for use, and when water is available, are key for decision makers and the application of water

law.”로, 이는 물 센서스는 모든 행정적 행위 및 관리의 가장 기초가 되면서 가장 중요하다는 점을 설명한 것으로서 물 센서스가 핵심 연구 방향에 포함된 이유를 간접적으로 설명하고 있다.

3.7 기타 신기술 분야

상기 6가지 기본 연구 방향에 추가하여 신기술 개발 분야를 따로 언급하고 있다. 본인이 생각하기에 신기술 개발 분야는 상기 6가지 연구 방향의 달성을 위해서 기본적으로 갖추어야 할 사항임과 동시에 세계의 기술을 선도하는 미국 지질조사소로서는 중요한 사항으로 간주하고 있는 것 같다. 이를 위하여 크게 2가지 신기술 분야에 대하여 언급하고 있는데 하나는 데이터 통합(Data Integration)이며, 두 번째는 기술의 개발(Evolving Technology)이다.

데이터 통합에 대해서는 지구에 대한 새로운 이해를 위하여 모든 데이터가 연계되는 것은 필수적인 요소라고 강조하고 있으며, 이를 위해서는 전 세계적인 공동 노력이 필요한데 예를 들면 GEON(Geoscience Network) 및 NEON(National Ecological Observatory Network) 등 세계적인 네트워크에 대하여 개선된 속도의 데이터 접근이 가능하게 할 것으로 보고 있다. 전통적인 다운로드 방식의 데이터 접근에서 실시간 무선통신을 이용한 자료 접근 방식으로 변경되고, 대용량의 데이터 처리를 위한 서버 및 모델링 기능들이 개발, 활용될 것으로 보고 있다.

기술 개발로는 나노기술(Nanotechnology)의 개발과 병행한 미국지질조사소의 연구 방향을 언급하고 있는데, 나노기술 개발에 따라 물, 생태계 및 인간 건강 등이 영향을 받을 수 있다. 따라서 나노 입자의 측정, 관측 및 위험도 평가 등의 연구와 나노 입자의 분산과 치환, 환경적 저항성, 주기 및 독성 효과 등에 대한 연구가 필요하게 된다. 기타 기술 개발 항목으로는 지구 미생물학(Geo-microbiology) 분야, 지구 내부 탐사 분야, 환경망 네트워크 구축 분야, 지표 영상 분야, 공간 모델링 분야, 분자 유전자 및 유전체학

분야 등을 핵심 분야로 선정하여 역할을 수행하는 것으로 설정하고 있다.

4. 결 언

이상 미국의 향후 전략은 통합 연계 연구로 모든 초점을 맞추고 있다. 기후, 지질, 재해, 수자원, 환경, 자원, 오염, 동식물 등 모든 것은 지구 생태 환경 내에서 유기적으로 연계되어 있고 독립적으로 다루어져서는 안 된다는 것을 인식하고 통합 연계 연구로 향후 연구 방향을 설정해 두고 있는 것이다.

현재 미국 지질조사소가 자연과학 분야의 세계 최고 기관으로 성장하고 변화하는 지구 환경에 발 빠른 대응전략 수립이 가능하게 된 데는 여러 가지 이유가 있겠지만, 본 연구 방향 보고서의 결론 부분에 그 중 한 가지를 수록하고 있다. 1997년 카네기 보고서(Carnegie Corporation Report)에 의하면, “더욱 규모가 크고 장기적인 자료 분석 등 복잡하고 다양한 분야의 연구를 위해서 현재의 조직 구조는 다소 미흡하다”고 밝히면서 “변화하는 환경 시스템 내에서 연구의 분열화를 줄이는 가장 드라마틱한 방법은 국립 생물학연구소(National Biological Service)를 미국 지질조사소내로 통합하는 것”이라고 밝힌 바 있다. 또한 “이를 통하여, 동일 환경 연구 조직 내에서 생명 과학자와 지구과학자가 함께 협동함으로써 그 동안 환경연구 분야에서 다소 부족해 왔던 복잡 다양한 형태의 통합된 지식과 기술 개발을 가능케 한다”라고 직시한 바 있다 (Carnegie Commission on Science, Technology, and Government, 1997). 이후 두 기관은 통합되어 지구를 거대한 하나의 시스템으로 직시하고 환경 전체에 대한 연구 분야에 박차를 가하면서 오늘의 미국 지질조사소로 거듭날 수 있었음을 설명해 주고 있다. 이 내용은 지구 환경 및 생태 연구를 위해서는 관련 분야의 통합 연구가 꼭 필요하다는 것을 결론 부분에 첨언하고 있는 것이다. 그러면서, 미국 지질조사소 내의 다양한 분야 연구에

대한 상호 연계 통합이 다음 10년의 핵심임을 인지하고 환경문제 해결에 동참을 요구하는 것으로 보인다.

본인이 미국 지질조사소라는 거대한 연구 조직의 향후 10년 연구 방향을 보면서 느낀 점은, 우리의 기술 선진화를 위해서는 해외에서 학업/연구하는 우수한 젊은 과학자를 지속적으로 양성하여 최신 기술을 빠르게 도입하는 것이 중요하겠지만 보다 중요한 점은 다음이 아닐까 여겨진다. 첫째는 우수 인력의 안정적인 연구 환경 조성과 분산된 연구 인력이 상호 연계 협력할 수 있는 구조를 마련하여 시너지 효과를 도출하는 것이며, 둘째는 기초 자료의 지속적 관측 및 수집을 정책의 상위 수준에 두어 데이터에 근거한 연구, 평가 및 신뢰성 높은 예측을 가능하게 하고 이로부터 보다 안정적 국가 운영을 도모하는 것이다.

마지막으로, 미국 지질조사소의 향후 10년 연구 방향 보고서 세부 내용에 관심이 있으신 분은 <http://pubs.usgs.gov/circ/2007/1309>의 원본을 참고하시기 바랍니다.

참고문헌

- Arctic Climate Impact Assessment, 2004, Impacts of a warming Arctic—Climate impact assessment: Cambridge University Press. <http://www.acia.uaf.edu>
- Carnegie Commission on Science, Technology, and Government, 1997, Federal environmental research and development status report with recommendations, March 1997: Carnegie Corporation of New York. http://www.carnegie.org/sub/pubs/science_tech/fedenv.htm
- Cayan, D.R., Kammerdiener, S.A., Dettinger, M.D., Caprio, J.M., and Peterson, D.H., 2001, Changes in the onset of spring in the Western United States: Bulletin of the American Meteorological Society, v. 82, 399–415.
- Hinzman, L.D., and others, 2005, Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other Arctic regions: Climate Change, v. 72, 251–298.
- Hodgkins, G.A., and Dudley, R.W., 2006, Changes in the timing of winter–spring high streamflows in eastern North America 1912–2002: Geophysical Research Letters, v.33, no.6, p. L0640210.1029/2005GL025593
- Huntington, T.G., Hodgkins, G.A., Keim, B.D., and Dudley, R.W., 2004, Changes in the proportion of precipitation occurring as snow in the New England(1949 to 2000): Journal of Climatology, v. 17, no. 13, 2626–2636.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, Climate challenge 2007: The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., maskell, K., Dai, X., and Johnson, C.A., eds.: Cambridge, United Kingdom and New York, Cambridge University Press, p.881, <http://www.ipcc.Ch/SPM2feb07.pdf>
- Knowles, Noah, Dettinger, M.D., and Cayan, D.R., 2006, Trends in snowfall versus rainfall for the Western United States: Journal of Climate, v. 19, no. 18, 4545–4559.
- Mote, P.W., 2003, Trends in snow water equivalent in the Pacific Northwest and their climatic causes: Geophysical Research Letters, v. 30, no. 12, article 1601.
- National Science and Technology Council,

- 2004, Science and technology to support fresh water availability in the United States: Washington D.C., Report of the National Science and Technology Council, Committee on Environment and Natural Resources, Subcommittee on Water Availability and Quality, p.19, http://www.ostp.gov/NSTC/html/swaqaqreport_2-1-05.pdf
- Stewart, I.T., Cayan, D.R., and Dettinger, M.D., 2005, Changes toward earlier streamflow timing across western North America: *Journal of Climatology*, v. 18, 1136-1155.
- Striagl, R.G., Aiken, G.R., Dornblaser, M.M., Raymond, P.A., and Wickland, K.P., 2005, A decrease in discharge-normalized DOC export by the Yukon River during summer throught autumn: *Geophysical Research Letters*, v. 32, L21413, doi:10.1029/2005GL024413. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2005GL024413.shtml>
- USDOI and USGS, 2007, Facing Tomorrow's Challenges-U.S. Geological Survey Science in the Decade 2007-2017: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, p.67, <http://pubs.usgs.gov/circ/2007/1309>
- Wickland, K.P., Striagl, R.G., Neff, J.C., and Sachs, Torsten, 2006, Effects of permafrost melting on CO₂ and CH₄ exchange of a poorly drained black spruce lowland: *Journal of Geophysical Research*, v. 111, G02011, doi:10.1029/2005JG000099. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005JG000099.shtml>