

기후변화에 대응하기 위한 적응형 수자원 관리



강민구
 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원
 kmg901@hanmail.net

1. 서론

새로운 패러다임의 등장과 경제 성장 및 사회 발전은 사회 구성원들의 자원 이용에 대한 가치시스템의 변화를 초래한다. 또한, 수계의 물리적 특성, 물관리 환경, 기후 및 기상, 생태계 및 환경 등의 변화로 인해 자연 시스템이 변하게 된다. 특히, 가치시스템은 사회-경제 시스템, 자연 시스템들의 변화로 부터 영향을 받으며, 사회 구성원들의 선호도가 변함에 따라 기존 시스템의 운영, 새로운 사업의 계획, 사업 결과의 평가 및 보완 등에 적용되는 기준들이 변하거나 이들 사이의 중요도가 달라진다. 이와 같은 변화들은 시스템의 운영 전략 및 방법, 새로운 대책의 계획, 시스템의 변경 및 설계 등에 영향을 미치며, 변화에 적응하기 위하여 많은 노력들이 수반된다.

수계의 수자원은 사회-경제 시스템 및 자연 시스템과 직·간접적으로 연관이 되어 있기 때문에 이들의 변화에 따라 수자원 개발과 관리의 목표 및 목적, 원칙, 물관리 환경 등이 변하게 된다. 수계 내에서 진행되는 수자원 사업과 수자원 운영 및 관리도 이들과 상호 영향을 미친다. 특히, 수자원 사업은 사업 완료까지 장기간이 소요되며, 사업의 영향이 크고 범위가 넓으므로 사후관리에 대한 중요성도 높다. 또한, 사

업 추진 기간 내에 새로운 기술이 도입될 수 있으며, 기후변화, 사회-경제 시스템의 변화, 사회적 선호도의 변화가 발생할 수도 있다. 따라서 관련 여건들의 변화에 따라 사업 추진과 사후관리의 불확실성이 커지게 된다. 이를 완화시키기 위해서는 대상 시스템에 대한 이해를 증진시키고, 단계별 평가결과와 여건들의 변화를 반영하여 계획과 대책을 수정 및 보완해야 한다. 또한, 이들의 원활한 수행을 위해서는 적절한 평가와 피드백이 필요하다. 특히, 최근 진행되고 있는 기후변화는 사회-경제 시스템, 생태계 시스템 등에 미치는 영향이 크며, 수자원 운영과 관리의 불확실성을 증대시킬 것으로 전망되고 있다. 또한, 향후 수자원 개발과 관리는 기후변화뿐만 아니라 관련 여건들의 변화와 이들의 상호작용에 의해 불확실성이 더 커질 것으로 전망되고 있다(한국건설기술연구원, 2007). 따라서 수자원 사업의 원활한 진행과 사후 관리, 기존 시스템들과 조화, 새로운 패러다임의 등장, 기후 및 환경 변화 등에 대응하기 위해서는 적응형 관리의 도입이 필요하다.

적응형 관리는 “행하면서 배우다”라는 관리전략이며, 대상 시스템에 대한 정확한 이해와 반응에 대한 지식이 없는 상태에서 사업을 추진하는 경우에 적용되고 있다. 수자원 사업과 관련된 여건들은 높은 불확실성을 가지고 있으며, 사회적 및 정치적 선호도에 따라 사업의 존폐여부가 결정될 수 있으며, 패러다임의 변화에 따라 사업의 목표가 변경될 수 있다. 적응형 관리는 이와 같은 불확실성을 인식하고 단계별로 사업을 추진하면서 대상 시스템에 대한 이해를 증진시킨다. 또한, 적응형 관리에서는 단계별 결과에 대한 평가를 반영하여 계획과 대책을 수정 및 보완하면

서 사업을 진행시킨다(Freedman, 2004). 적응형 관리의 현재 미국의 여러 지역에서 수자원 관리의 발전 단계를 바꾸는데 적용이 되고 있다. 예를 들어, 플로리다 에버그레이드 생태시스템의 복원 프로그램, 루지애나의 해안 생태계 복원 계획, 미시시피강 상류와 미조리강 시스템의 관리 등을 포함해서 여러 지역의 생태계 복원 및 수자원 관리에 적용되고 있다(PAMRS, 2004).

본 논문에서는 향후 기후변화 전망과 이의 영향, 이에 대응하기 위한 적응형 관리의 도입 필요성 및 적용 사례, 기후변화에 대응하기 위한 국내 수자원 관리 방향과 적응형 수자원 관리 프로세스에 대하여 고찰하였다.

2. 기후변화 전망과 이의 영향

최근 지구 온난화와 이상 기후에 의한 피해들이 세계 각지에서 나타나고 있다. 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 1988년에 설립한 “기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC)”은 2007년에 발표한 제 4차 평가 보고서에서 기후변화가 자연적인 요인에 의한 것 보다는 인간이 만들어내는 공해물질과 온실가스에 기인하고 있다고 밝힌 바가 있다. 또한, 이 보고서에서는 기후변화를 자연적 요인과 인류 발생적 요인에 의해 최고 기온과 최저 기온이 상승하여 기존의 기후 패턴에서 새로운 기후 패턴으로 변하는 것으로 정의하였다. 이 보고서에서는 기후변화를 예측하기 위해 시스템의 추진력을 인구, 경제, 기술, 에너지, 농업으로 구분하고 경제성장과 환경 보호, 지역화와 세계화로 구분하여 이들의 조합으로 기후변화 시나리오를 구성하였다. 설정된 기후변화 시나리오는 2000년 농도 지속, A1B, A1FI, A1T, A2, B1, B2 등과 같이 7개이다. 이들 시나리오에 의해 예측된 2100년의 평균기온은 2000년에 비해 평균기온이 0.3℃~6.4℃ 증가할 것으로 전망되었으며, 해수면은 1980~1999

년에 비해 2090~2099년에 0.18 m~0.59 m 상승하는 것으로 예측되었다. 이들 시나리오 중에서 가장 높은 기온 상승을 나타낸 것은 A1FI이며, 가장 낮은 기온 상승을 나타낸 것은 2000년 농도가 지속한다는 시나리오이다. A1FI 시나리오는 화석에너지를 계속적으로 사용하고, 매우 빠르게 경제가 성장하며, 세계화가 계속 진행될 것으로 예상하는 것이다. 이 시나리오에 의한 해수면 상승량도 다른 것에 비해 크게 나타났다(IPCC, 2007).

전지구적인 기후변화의 영향으로 세계 곳곳에서는 극심하게 더운 날과 추운 날의 발생 빈도가 증가하고 있다. 또한, 가뭄과 홍수 피해가 빈번하게 발생하고 있으며 피해규모도 커지고 있다. 일반적으로 기후변화의 영향은 농업, 수자원, 해수면 상승, 환경 및 보건 분야에서 나타날 것으로 전망되고 있다. 농업분야의 영향으로는 ① 곡물재배 가능 면적 감소에 따른 곡물 생산량의 감소, ② 건조 및 준건조 지역의 토양 수분 감소로 산불 피해 증가 등이 예상되고 있다. 수자원 분야의 영향으로는 ① 농업용수 부족과 토양 수분 손실 증가에 따른 관개비용의 증가, ② 하천 유량 변동에 따른 수자원 개발 및 운영의 불확실성 증대, ③ 가뭄 및 홍수 피해의 규모 증가 등이 예상된다. 또한, 기후변화는 해수면 상승 및 평균 기온 상승을 초래하고 이에 따라 ① 토지 및 습지대의 손실, ② 생태계의 변화, ③ 태풍, 허리케인 등의 규모 증가와 이에 의한 피해 증가 등이 나타날 것으로 예상된다. 그리고 환경 및 보건 분야에서는 ① 강우 및 하천유량의 변동에 따라 심각한 수질 오염 발생, ② 저개발 지역에서 음용수 부족 및 오염, ③ 개인위생 수준 저하 및 전염병 발생, ④ 대기 및 수문 순환이 원활하지 못함 등과 같은 피해가 기후변화에 의해 발생할 것으로 전망되고 있다.

한반도에서도 전지구적인 기후변화와 국지적인 기후변화로부터 많은 영향을 받을 것으로 예측되고 있다. 특히, 농업 분야에서는 수확량 감소가 예상되며, 수자원 및 환경 분야에서는 강우량 및 수문순환의 불

확실성이 증가하여 수자원 개발과 운영에 많은 문제들을 야기할 것으로 예상된다. 특히, 가뭄 및 홍수와 같은 자연재해가 빈번히 발생하고 피해규모가 커질 것이며, 하천 수질 및 생태계의 훼손 및 관리의 어려움이 발생할 것으로 예측되고 있다. 권원태(2007)는 기후변화모형을 사용하여 동아시아에 대한 지구 온난화 실험을 실시한 바가 있으며, 이 연구에서는 21세기 말에 동아시아의 평균 기온은 B1, A1B, A2 시나리오별로 1.8℃, 2.6℃, 3.0℃ 증가하고, 강수량은 2%~3% 증가할 것으로 전망되었다. 또한, A1B 시나리오를 적용한 저해상도 기후변화 모형을 사용하여 실험한 결과, 한반도의 21세기 말 기온은 4.0℃ 상승하고, 강수량은 16% 정도 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 기온은 가을과 겨울에 가장 많이 상승하여 여름엔 고온일이 증가하고, 겨울엔 저온일이 감소할 것으로 전망되었으며, 강수량은 가을에 증가하는 추세를 나타낼 것으로 전망되었다. 향후 한반도의 기후는 태백 및 소백산맥 지역을 제외하고 서해안과 동해안 중부지역은 아열대 기후로 변화할 것으로 예상되었다. 배덕효 등(2007)은 IPCC SRES A2 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 5대강 수계 139개 유역의 수자원 변동성을 시·공간적으로 분석한 바가 있다. 이 연구에서는 한반도의 기온이 1℃ 상승함에 따라 실제증발산량이 3.4%~5.3% 변할 것으로 전망되었다. 또한, 강수량이 ±10% 변화할 경우, 유출량은 한강 -18.2%~12.4%, 낙동강 -21.6%~14.6%, 금강 -17.5%~11.5%, 섬진강 -18.4%~10.6%, 영산강 -19.9%~12.7%로 변동할 것이라는 결과가 제시되었다. 이와 같이 기후변화에 따라 한반도에서는 수자원의 변동성이 커지고 홍수 규모와 빈도가 증가할 것으로 전망되고 있다. 또한, 태풍의 강도가 증가하고, 대규모 태풍 발생 빈도가 증가할 것으로 전망되므로 이에 대한 대책수립이 필요하다(권혁조, 2005; 문승록, 2007). 이와 같은 연구결과를 살펴보면, 전지구적인 기후변화는 국내의 농업, 산림, 수자원, 환경 및 보건, 자연재해 등에 많은 영향을 미

칠 것으로 예상된다.

기후변화의 영향에 효과적으로 대응하기 위하여 많은 대책들이 제시되고 있다. 특히, 대기 중으로 방출되는 CO₂ 농도를 저감시키기 위해 화석연료의 사용을 줄이고, 바이오 에너지 및 청정에너지 사용이 장려되고 있다. 기후변화의 징후들은 기온의 변화뿐만 아니라 해수면의 상승 및 생태계의 변화 등으로 나타나고 있다. 이의 영향도 여러 연구결과들에 의해 제시되고 있으며, 기후변화의 영향 완화와 기후변화에 대한 적응을 고려한 대책의 수립 및 시행이 필요하다는 의견들이 제시되고 있다. 이명균(2007)은 기후변화가 생태계 및 세계 경제에 미치는 영향이 크며, 경제에 미치는 영향으로는 ① 기상재해에 의해 직접적인 경제적 피해 초래, ② 경제 성장과 온실 가스 배출 사이의 상관관계를 낮추려는 각종 정책 및 수단의 실행이 미치는 영향 등이 있다고 주장하였다. 따라서 기후변화로 인한 피해를 저감하기 위해서는 ① 현재 진행 중인 기후변화에 적응, ② 온실 가스 배출을 줄이려는 협력, ③ 화석 연료 사용 저감 및 청정 에너지의 지속가능한 개발, ④ 신기술 연구 개발 및 탄소 배출권 거래 시장과 같은 정책 시행 ⑤ 저탄소 에너지 개발을 장려하기 위한 새로운 투자 메커니즘의 도입 등이 필요하다고 주장하였다. 또한, 향후 기후변화에 효율적으로 적응해야 하며, 저탄소 경제를 지향하는 시스템으로의 변화가 필요하다고 주장한 바가 있다. 이와 같이 기후변화는 불확실성이 크기 때문에 다양한 시나리오를 적용하여 향후 변화를 예측하고 단일한 대책이 아니라 선택의 범위가 넓은 대책들을 수립할 필요하다. 그리고 효율적인 정책의 수립과 지속적인 추진이 필요하며, 지속가능한 수자원 개발과 관리가 이뤄지도록 대책이 수립되어야 한다.

3. 적응형 관리의 필요성 및 적용 사례

최근 발생하고 있는 수자원 문제에 대해 보다 구체

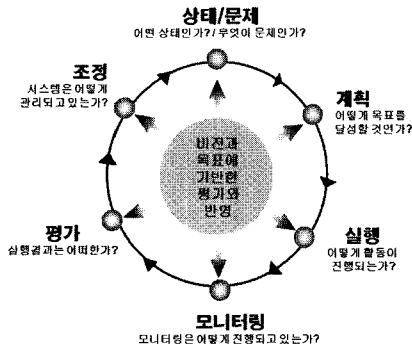


그림 1. 적응적 사업 진행 및 각 단계별 평가 내용

적이고 종합적인 해결 방안을 찾기 위해서는 먼저 문제의 원인들을 분석해야 한다. 수자원 관련 문제들은 단일한 원인에서 비롯된 것으로 보기 어렵다. 지리 및 지형, 기후 및 기상, 사회 및 경제, 환경, 사용자 등과 같은 원인들이 복합적으로 작용하여 발생한 것이다. 이것들이 수자원에 미치는 영향은 수계의 상·하류에서 다양하게 나타나고 있다. 따라서 과거와 같은 방법을 사용해서 문제를 해결하는 것에는 한계가 있다. 또한, 앞으로의 수자원 사업은 현안 문제의 해결방안만을 찾는 것이 아니라 향후 발생할 문제를 미리 예측하여 피해의 강도를 완화시킬 필요가 있다. 따라서 현재 발생하고 있는 문제들의 원인을 조사하여 분석하고, 향후 발생할 문제를 먼저 예측해야 한다. 또한, 수자원을 현세대의 요구를 충족시키면서 후손들이 사용이 가능하도록 지속가능하게 사용해야 한다. 이를 위해서 수자원과 관련된 활동들이 지속가능하게 행해지고 있는가에 대한 주기적인 평가와 점검이 필요하다. 또한, 지역 주민과 전문가들의 적극적인 참여가 필요하며, 이를 위한 사회 및 제도적 장치가 마련되어야 한다. 이와 같은 관련 여건들의 변화는 기후변화와 함께 수자원 이용의 목적들 사이에 갈등을 초래하므로 적절한 방법을 적용하여 조정해야 한다. 또한, 과거 운영에 대한 평가와 새로운 환경에 적응하기 위한 새로운 운영 전략의 수립이 필요하다. 그리고 제도 및 시스템 운영 방법을 변화된 환경에 맞춰 수정 및 보완해야 한다. 수자원 사업은 수자원

량의 변동성과 관련 여건들로부터 영향을 받기 때문에 불확실성이 크다. 따라서 기후변화와 같은 환경 변화에 대한 대상 시스템의 반응을 이해하면서 사업을 추진하고 단계별로 평가하며, 평가결과를 피드백하여 문제를 해결하는 적응형 관리(adaptive management)가 필요하다.

3.1 적응형 관리의 개념

적응형 관리는 “행하면서 배우다.”라는 관리전략이며, 대상 시스템에 대한 정확한 이해와 반응에 대한 지식이 없는 상태에서 사업을 추진할 경우에 적용되고 있다. 수자원 사업과 관련된 여건들은 높은 불확실성을 가지고 있다. 또한, 사회적 및 정치적 선호도에 따라 사업의 존폐여부가 결정될 수 있으며, 패러다임의 변화에 사업의 진행이 변경될 수 있다. 적응형 관리는 이와 같은 불확실성을 인식하고 그림 1과 같이 단계별로 사업을 추진하면서 대상 시스템에 대한 이해를 증진시키고, 결과를 반영하여 계획과 대책을 수정 및 보완하면서 사업을 진행시킨다. 적응형 관리는 대상 시스템에 대한 정확한 정보가 없으며, 관련자들이 시스템에 대한 명확한 이해를 하고 있지 않은 상태에서 정책이나 프로젝트를 수행하는 경우에 일반적으로 적용된다. 수자원 사업 및 생태계 보존 사업에는 많은 관련자들이 포함된다. 여러 분야의 전문가, 시민단체, 지역민, 이해관계자, 중앙 및 지방 정부의 공무원 등이 참여하여 시스템에 대한 이해를 증진시키고, 이들 사이의 합의를 통해서 사업을 단계적으로 추진시킨다. 사후에도 기후 및 환경 변화에 의한 불확실성이 높기 때문에 관련 여건들의 변화에 대한 대상 시스템의 거동 파악과 반응 예측을 통해서 사후관리를 실시한다.

3.2 적응형 관리의 필요요소

적응형 관리는 단계별로 피드백과 학습을 포함한

다. 각 단계의 결과를 평가하고 자료 및 모형을 업데이트하여 다음 단계를 실행하기 위해 학습과 예측을 실시한다. 이 과정에서 관련 여건들의 변화나 자연적 변화에 의해 목표나 비전을 달성하지 못하면 피드백하여 계획을 수정 및 보완하여 변화된 환경에 맞춰서 사업이 진행된다. 따라서 관리 목표, 관리 대상 시스템의 모형, 관리 행위의 선택 범위, 모니터링 및 결과의 평가, 결과의 학습과의 병합, 제도 및 기구 등이 적응형 관리를 수행하기 위한 필수 요소들이다. 적응형 관리는 사업을 추진하기 전에 사업의 목표, 목적, 원칙에 대한 참여자들의 합의를 요구한다. 이들에 대한 합의가 이루어지면 이를 바탕으로 시스템의 상태를 평가하고 문제를 파악할 수 있으며, 사업의 진행이 용이해진다. 또한, 사업의 계획도 정기적으로 점검되어 변화된 환경에 맞춰서 수정 및 보완된다. 적응형 관리는 대상 시스템에 대한 명확한 이해가 있는 상태에서 사업을 시작하는 것이 아니고 부족한 이해에서 출발하여 사업을 시행하면서 얻은 학습과 정보를 통해서 시스템에 대한 이해를 향상시켜 나간다. 적응형 관리에서는 초기 단계에 대상 시스템에 대한 명확한 이해가 부족하기 때문에 기초 자료를 사용하여 시스템에 대한 이해를 돕기 위하여 모형을 개발하여 사용하며, 추가적으로 얻어진 정보를 바탕으로 모형을 업데이트하여 관리 행위에 대한 시스템의 반응을 이해할 수 있도록 하며, 참여자들의 대상 시스템에 대한 이해를 증진시킨다. 적응형 관리에서는 축적된 자료들을 바탕으로 단일한 최적 관리 정책을 선정하여 시행하지 않으며, 각 단계의 결정에서 가능한 광범위한 관리 대안들이 고려되어야 한다. 사업의 진행에 따라 나타나는 불확실성에 대처하기 위해서는 많은 관리 대안들을 만들어 환경 및 기후, 선호도, 패러다임 등의 변화와 시스템의 거동에 적합한 대책을 적용해야 한다. 적응형 관리에서는 관리 목표를 향한 진행 정도를 측정하기 위하여 모니터링이 실시된다. 모니터링을 통하여 자연적 변동과 관리 행위에 의한 변동을 구별해야 한다. 모니터링 결과는 대상 시스템

에 대한 이해를 증진시키며, 관리 결정의 결과 평가와 더 나은 의사결정을 위한 기초 자료로 사용된다. 적응형 관리에서는 프로세스 내에서 얻은 정보를 피드백하기 위한 메커니즘이 필요하며, 이러한 정보와 자료를 바탕으로 문제를 파악하고 이에 대한 대안들을 수립한다. 적응형 관리에서 모니터링을 통해서 얻은 지식을 관리 행위에 통합시키는 메커니즘이 없으면 모니터링과 학습은 보다 좋은 관리 결정과 정책을 만들지 못한다. 따라서 모니터링과 평가를 통해서 얻은 정보를 피드백하고 반영하여 계획을 수정하고 보완한다. 이와 같은 적응형 관리의 원활한 수행을 위해서는 법적으로 인정받는 제도 및 기구가 필요하다. 미국에서는 적응형 관리를 수계관리나 생태계 복원 프로그램에 적용하기 위해서 의회의 승인을 받아 인적자원과 재원을 사용한다. 이와 같이 적응형 관리를 적극적으로 추진하기 위해선 자원을 사용할 수 있는 권한을 법적으로 승인받아야 한다. 따라서 수자원 개발 및 관리, 생태계 복원 등의 사업에 적응형 관리를 도입할 것을 법적으로 규정할 필요가 있다.

3.3 적응형 관리의 적용 사례

적응형 관리는 1990년 대 중반부터 미국의 여러 지역에서 수자원 관리 단계를 바꾸는데 이용되고 있다. 미국 공병단 토목공사 중에서 적응형 관리는 환경이나 생태계 복원 프로젝트에 주로 적용이 되어오고 있다. 공병단 수자원 사업들 중에서 생태 복원 사업은 수문 순환이외에도 물리적, 화학적, 생물학적 과정을 재정립하는 것을 포함한다. 또한, 공병단의 수자원 사업인 수문과 홍수조절 프로젝트는 복잡한 상호작용과 불확실한 결과를 수반하기 때문에 적응형 관리 접근 방식이 공병단 프로젝트 전체를 관리할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 더욱이, 공병단 프로젝트부터 기대되는 편익들이 표 1과 같이 시대를 넘어 넓어지고 있기 때문에 주기적으로 프로젝트의 결과를 평가하고 부수적으로 운영 정책을 조정하는 접

표 1. 미국 수자원 사업들의 본래 편익과 추가적인 편익

수자원 시스템	본래 편익	추가적인 편익
미시시피강 상류	수운	생태 및 레크리에이션
미시시피강 중류	수운, 홍수 조절	생태 및 레크리에이션
미시시피강 하류	수운, 홍수 조절	습지 복원 및 보전
콜롬비아강	수력 발전, 수운, 홍수조절	연어 생태 및 어족 복원
미조리강	수운, 홍수조절, 관개	생태 및 레크리에이션
에버그레이드	경작지, 관개, 홍수조절	에버그레이드 복원 및 수자원 공급
루이지애나 해변	홍수 방지, 수운, 오일 및 가스 개발	습지 복원
그랜 캐니언 댐	수력 발전	레크리에이션 및 멸종위기 종자 보호
키시미강	홍수조절	습지 복원

근 방식이 프로젝트 결과와 사회적 필요성을 시대를 넘어 조화롭게 하기 위하여 요구되고 있다.

미국 공병단은 미국 수문 시스템의 거대한 부분을 조절하는 기반시설을 관리한다. 다른 여러 조직들이나 부문들과 같이 이 기구의 운영은 새로운 프로젝트 추진 중심에서 기존 기반시설에 대한 더 양호한 관리 중심으로 이동하는 과정에 있다. 공병단의 수자원 사업은 패러다임 변화, 기후 및 환경 변화, 사회적 목표 및 선호도의 변화에 직면해 있다. 따라서 공병단은 적응형 관리를 통하여 이러한 변화에 대응하고 있으며, 이를 플로리다 에버그레이드 생태시스템의 복원 프로그램에 적용한 바가 있다. 또한, 공병단은 미시시피 상류, 미조리 강과 저수지 시스템, 루이지애나 해안 생태계 복원 등에 참여해 오고 있다. 공병단은 Glen Canyon 댐과 콜로라도 강 생태계 복원의 적응형 관리에는 참여하지 않고 있으며, 콜롬비아 강의 적응형 관리에는 Northwest Power and Conservation Council (NPPCC)과 연방 및 주 정부가 참여하고 있다(PAMRS, 2004).

(1) 플로리다 에버그레이드 생태계 복원

에버그레이드 생태 시스템은 플로리다 Okeechobee 호수 인근과 이곳의 남쪽지역까지 뻗어 있으며, 1947년 국립공원으로 지정되어 관리 되어왔다. 18세기 중반부터 농업과 정주를 위해서 개발되기

시작했으며, 배수로를 설치하여 개발하였다. 1947년 ~1948년의 대홍수 이후 홍수 피해를 방지하기 위하여 제방, 저류지, 대규모 배수 펌프장을 건설했으며, 배수로를 개선하였다. 이에 따라 수문변화가 발생하고 조류가 감소하고 수심 종의 동식물이 생존의 위협을 받아왔다. 이를 해결하기 위하여 종합적 에버그레이드 복원 계획(Comprehensive Everglades Restoration Plan, CERP)이 수립되었으며, 이 계획에 적응형 관리가 도입되었다. 이 계획에 의해 적응형 관리가 수자원 관리를 위한 접근 방식 중의 하나로 명확하게 인정을 받았으며, 공병단은 CERP의 운영 및 관리 비용을 주정부와 공유하게 되었다. 이 계획은 2000년 수자원 개발 법(Water Resources Development Act, WRDA)에 의해 승인을 받았으며, 30년 이상 동안 약 78 억 달러가 소요될 것으로 추정된다. 이 계획은 68개의 세부 프로젝트로 구성되어 있으며, 지표수 저류 저수지, 수자원 보존 지역, Okeechobee 호를 생태자원으로 관리, 만 방향으로 용수 공급 개선, 지하수 저류, 습지 처리, 에버그레이드 방향으로 용수 공급 개선, 지표수 차단벽의 철거, 기존 원천에 수자원 저류, 하수의 재이용, 파일릿 프로젝트, 수자원 보존의 향상, 추가적인 실행가능성 연구 등이 있다. 이 계획은 규모가 크고 복잡하기 때문에 실행에 수십 년이 걸리므로 개별 프로젝트에 대한 세부적인 연구가 필요하다. 따라서 계획을 진행시

키면서 평가와 개선이 필요하므로 적응형 관리가 필요하다. 이곳에서 적응형 관리는 자연과 인간 시스템에 대한 이해를 향상시키고, 변화되거나 예견되지 않았던 환경을 반영하여 계획을 개선하게 한다. 이를 위해서 업데이트되는 모형, 새로운 과학기술, 모니터링 및 결과의 평가, 목표의 수정 및 계획의 변경 등이 필요하다(PAMRS, 2004).

(2) 그랜 캐니언 댐과 콜로라도강 생태계 관리

미국에서 주목할 만하고 지속적인 적응형 관리를 실시하고 있는 것은 그랜 캐니언의 적응형 관리 프로그램(Glen Canyon Adaptive Management Program, AMP)이다. AMP는 그랜 캐니언 댐의 운영이 댐 하류 자원에 미치는 영향에 대하여 장기간 동안 연구하고 모니터링하기 위하여 1997년에 시작되었다. 이 프로그램은 그랜드 캐니언 안의 콜로라도강 생태계 복원에 초점이 맞춰져 있다. 그랜 캐니언 댐의 운영이 하류에 미치는 영향에 대한 우려 때문에 만들어진 환경 영향 선언(environmental impact statement)은 미국 내무부 장관에게 계속적인 근거에 대한 조언을 제공하기 위하여 AMP를 수립하였다. AMP는 ① 정책, 활동, 실행 등의 잠재적 효과를 파악하기 위한 모형 개발, ② 댐 운영과 기타 활동들이 콜로라도강 생태계에 미치는 영향과 관련된 시험 가능한 가정으로 구성된 질의, ③ 가정과 질의에 대한 답을 찾기 위한 실험, ④ 관리 행위에 의해 나타나는 사전 예측의 정확성과 완벽성에 대한 모니터링과 결과의 평가, ⑤ 실험을 통하여 내무부 장관에 대한 조언과 관리 선택에 합병될 새로운 지식과 정보 등을 포함하는 적응형 관리의 접근법과 프로세스를 따른다. AMP는 그랜 캐니언 댐 운영이 그랜드 캐니언 안의 콜로라도 강 하류 생태계를 심각하게 변경시켰다는 인식에서 출발하였다. 그동안의 AMP의 실행의 교훈은 ① 생태계 복원에 초점이 맞춰진 의회 법률이 필요함, ② 이해관계자들 사이에 합의를 이루는 것이 어려움, ③ 생태 모니터링 결과와 관련된 불확실성과

불일치 존재, ④ 관리 행위의 결과를 정확하게 예측할 수 없는 과학의 한계, ⑤ 논쟁적이고 세련된 문제를 해결하기 위한 독립적 검토가 필요함 등과 같다(PAMRS, 2004).

4. 기후변화를 고려한 적응형 수자원 관리

4.1 수자원 관리의 적응 과정

수계나 유역을 구성하는 요소로는 토지, 생태 및 환경, 수자원, 사회 및 경제, 유역의 지형 및 기후, 이들을 연결하는 하천 등이 있다. 또한, 이들을 관리하고 유지하는 수요자, 법률 및 제도도 유역을 구성하는 요인들 중의 하나이다. 이들은 상호 영향을 미치면서 연결되어 있다. 따라서 한 요소의 변화는 다른 요소에 영향을 미치며, 시스템을 구성하는 요소들은 인과관계와 피드백으로 연결되어 있다. 기후변화는 수계를 구성하는 사회 및 경제 시스템, 생태계, 수자원, 기타 구성요소들에 영향을 미친다. 예를 들어 기후변화에 의한 수문순환의 변화는 생태계 훼손, 홍수 피해, 수질 저하 등과 같은 문제를 발생시키며, 사회 및 경제 시스템에도 직·간접적인 영향을 미치며, 이에 따라 생활용수나 공업용수 사용의 변화를 초래할 수 있다. 기후변화는 수자원 양과 질에 영향을 미치며, 수자원의 변화는 사회 및 경제 시스템, 생태계의 변화를 초래한다. 이와 같은 작용에는 피드백이 발생한다. 예를 들어, 사회 및 경제 시스템의 변화는 온실가스 배출량 조절을 통해서 기후변화에 영향을 미치게 된다. 따라서 기후변화는 수계의 사회 및 경제 시스템, 생태계, 수자원 등에 영향을 미치므로 이들의 관계를 파악한 후에 기후변화의 영향을 분석할 필요가 있으며, 이를 완화시킬 수 있는 적절한 대책을 수립할 필요가 있다.

생태계 변화, 패러다임의 변화, 물관리 환경 변화 등에 효과적으로 대응하기 위해서는 그림 2와 같이

구조적 및 비구조적인 대책들을 적용하여 수자원 관련 사업들을 조정하고, 변화된 환경에 효과적으로 적응해야 한다. 특히, 패러다임 변화와 물관리 환경 변화는 수자원 이용의 목적들 사이에 갈등을 초래하므로 적절한 방법을 사용하여 조정해야 한다. 여건들의 변화들로 인해 수계에서 발생하는 수자원 문제를 해결하기 위해서는 이들이 사회-경제 시스템, 자연시스템에 미치는 영향들을 다양한 기준들로 평가하고 결과를 반영하여 적절한 대책을 선정하고 실행해야 한다. 그리고 대책들의 목표 달성정도를 주기적으로 평가하고, 여건 변화를 고려하여 목표 및 대책들을 수정 및 보완하면서 진행하는 적응과정이 필요하다. 특히, 기후변화는 극한 수문 사상의 발생과 수자원 운영의 불확실성을 가중시킬 것으로 전망되고 있어 이로 인한 수문순환의 적응과정을 고려한 수자원 운영 기법의 개발과 수자원 계획이 필요해지고 있다.

4.2 기후변화 및 수자원 관련 여건 변화에 대한 대응 방안

기후변화, 사회 및 경제 시스템의 변화, 가치시스

템의 변화, 생태계 변화 등과 같은 수자원과 관련된 제반 여건들의 변화에 대응하기 위한 수자원 개발 및 관리 방안에 대한 전문가들의 의견을 수집하기 위하여 설문조사결과를 분석하였다. 설문기간은 2007년 7월 16일부터 27일 사이에 실시되었으며, 설문대상은 한국수자원학회 회원들로 하였다. 설문조사에 총 145명이 참여하였으며, 그 중에서 40 명이 학계(28%), 34 명이 업계 (23%), 27 명이 연구원 (19%), 41 명이 공사 (28%), 3 명이 공무원 (2%)이었다. 본 설문조사의 신뢰수준은 95%이며, 최대허용오차는 3.8%이다.

수자원 이용과 관련된 설문조사 결과는 사회 및 경제적 여건, 생태계, 기후 등의 변화에 대응하기 위해서 변화된 환경에 적응하도록 기존 수자원 시설의 효율적 운영 방법을 재수립하고, 단기, 중기, 장기 계획과 대처 방안을 수립하여 시행하며, 법 및 제도의 조정을 통한 환경 변화에 적응이 필요하다는 것을 나타냈다. 또한, 설문조사 결과는 수자원 이용시 발생하는 갈등을 조정하기 위한 지역 주민들, 전문가, 환경단체의 적극적인 참여가 필요하며, 이들의 참여를 유도하기 위하여 스코핑(Scoping) 제도와 같은 참여 정

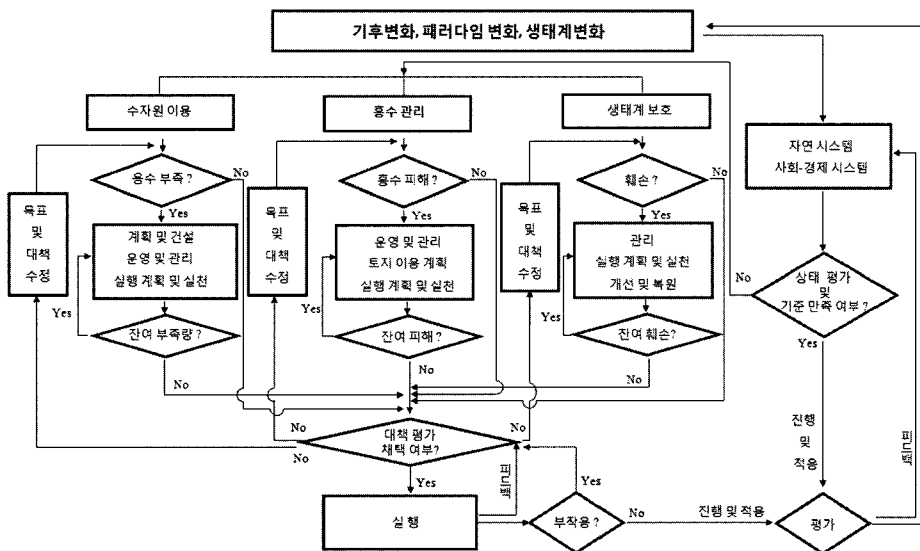


그림 2. 기후, 패러다임, 생태계 등의 변화에 따른 수자원 관리의 적응과정

책의 개발과 지속적인 시행이 필요함을 나타냈다. 또한, 지역주민 및 시민단체가 참여할 수 있는 적절한 방법에 대하여 위원회 설치 운영, 수자원 정책 교육 및 사업 공청회 참석 및 의견제시, 상향식(Bottom-up) 관리 등이 필요하다는 의견이 높은 응답률을 나타냈다. 효율적인 수자원 관리를 위해 우선적으로 추진해야 할 사업에 대하여 수계의 수자원 관리에 통합 수자원 관리의 원리를 도입, 환경, 기후, 사회 및 경제적 여건 변화를 반영한 물 관리 계획의 수정 및 적용, 댐 군의 연계운영을 통한 수자원의 효율적 이용 방법 개발 및 적용 등이 높은 응답율을 나타냈다.

홍수관리와 관련된 설문 조사 결과를 종합해 보면, 많은 응답자가 홍수 피해 증가의 원인으로 기후변화와 이상기후를 꼽고 있으며, 이에 대한 대책으로 하천의 홍수터 보전 및 관리, 하천 통수능력 증대, 하천 주변의 토지이용 규제 등이 높은 응답율로 제시되었다. 또한, 상류지역에 대한 토지이용에 대하여 강력한 규제가 필요하며, 홍수량 저감에 효과가 있기 때문에 적합한 대안을 수립하여 도시화의 영향을 줄이도록 해야 한다는 의견을 제시하고 있다. 상습 침수 피해 지역에 대한 관리 대책으로 이 지역에 거주하는 주민들을 이주시키고 하천의 일부나 저류지로 활용하거나 댐, 홍수 조절 댐, 저수지, 천변 저류지 등을 건설하여 피해를 저감시키는 방법이 제시되었다. 수해 방지를 위해 '적극적인 투자에 의한 구조적 및 비구조적 대책의 실행', '중장기적인 계획 수립 및 지속적인 정책의 추진' 등이 필요하다는 의견을 제시하였다. 홍수 피해 저감 사업들의 사후 평가 주기는 3년이나 5년 마다 실시하는 것이 적절하다는 의견을 제시하였다. 홍수 관련 사업의 평가, 사업에 대한 새로운 지침 작성, 사업의 평가 기준 설정에 대한 주기에 대하여 3년이나 5년 마다 실시하는 것이 적절하다는 의견을 제시하였다. 또한, 홍수 방어 대책 수립, 위험도, 평가 기준 설정에 전문가, 시민단체, 이해관계자들의 참여에 대하여 많은 응답자들이 이들의 참여가 필요하다는 의견을 제시하였다.

하천환경 관리와 관련된 설문조사 결과를 종합해 보면, 우리나라 수변 환경 관리에 대하여 많은 참여자가 보통 수준이거나 잘못되어 있다는 의견을 제시하였다. 하천 환경 관리를 개선하기 위해 '체계적인 하천 관리 계획을 수립과 지속적인 추진', '수계 상류에 대한 인위적인 개발을 지양하고 수변구역을 설정하여 하천 관리' 등이 필요하다는 인식을 하고 있는 것으로 나타났다. 오염 총량제 실시에 대해서는 많은 설문 응답자들이 제도의 보완이 필요하며 시행 후 계속적인 제도의 개선이 필요하다고 생각하거나, 수자원 시스템의 운영과 오염 총량제를 고려한 하천 시스템 운영 제도가 필요하다는 인식을 하고 있는 것으로 나타났다. 오염 총량제 실시 결과에 대한 평가 주기에 대하여 많은 응답자들이 3년이나 5년 정도가 적절하다는 의견을 제시하였다. 환경 영향 평가제의 개선점에 대하여 많은 응답자들이 환경 영향 평가의 장래 예측 능력 향상 및 사후 영향 평가와의 연계를 통한 영향 저감 대책 수립이 필요하다는 의견을 제시하였다. 하천 수질 향상 및 생태 복원을 위해 통합 유역 및 수계 관리를 통하여 체계적인 하천 관리 계획의 수립이 필요하며, 상류 오염원의 저감 및 차단 시설의 설치 및 운영, 하천의 수질 개선 및 친수 환경 조성 등이 필요하다는 의견을 제시하였다. 하천 환경 관리를 위한 유역별 위원회 설치에 대해서 유역 사정에 따라 시기를 조정하여 설치하고 상향식 관리를 적용할 필요가 있다는 의견과 빠른 위원회의 설치 및 적극적인 활동이 필요하다는 의견이 대다수를 차지하였다. 또한, 많은 응답자들이 하천 환경 관리에 대한 적절한 평가는 3년~5년 마다 주기적으로 실시하는 것이 적절하다는 의견을 제시하였다.

4.3 적응형 수자원 관리 프로세스

최근 수자원 개발과 관리의 의사결정 과정은 다분야적 접근을 요구하고 있다. 이는 수자원 문제를 파

약하고 문제를 해결하기 위해서는 관련된 분야들을 모두 고려해야 한다는 것이다. 수자원 문제와 관련된 요인들로는 기후변화와 같은 자연 시스템의 변화, 새로운 패러다임의 변화, 인구 증가와 경제적 성장과 같은 사회 및 경제 시스템의 변화, 생태 시스템의 변화 등이 있다. 이들 요인들은 상호 작용에 의해 유역이나 수계의 상태를 변화시키며, 이러한 변화에 적응하기 위해서는 새로운 수자원 운영 방법이나 프로젝트가 개발되어야 한다. 수계 관리는 사회적인 합의를 통하여 관리 목표를 설정하고 이를 달성하기 위해 세부적인 목적들과 원칙들을 수립한다. 이들을 달성하고 준수하기 위하여 수계의 문제를 파악하고 대책을 수립하여 시행한다. 시행결과를 단계별로 평가하여 계획과 대책을 수정 및 보완한다. 그림 3은 적응형 수자원 관리의 프로세스를 도식적으로 나타낸 것이다. 수계의 수자원 관리는 수계를 구성하는 자연 시스템이나 사회 및 경제 시스템, 가치 시스템의 변화로부터 영향을 받으며, 이들의 변화는 수계와 관련 있는 상업, 농업, 공업, 문화, 어메니티 등의 변화를 초래하여 수자원 관리에 영향을 미친다. 수계의 수자원 관리는 정치적 및 제도적 정황에서 수자원 정책이나 수자원 법률에 의해서 수행된다. 수자원 관련 정책 및 법률은 수자원 거버넌스에 의해서 수정 및 보완되며, 이들은 수자원 거버넌스의 형성에 영향을 미친다. 최근 수자원 거버넌스는 지역공동체, 중앙 및 지방 정부, 정부기관, 이해관계자, 전문가, 시민단체 등으로 구성되어 있다. 이들은 수자원 정책 및 법률을 제정하고 이들을 수정 및 보완하며 이를 위해서 수계의 자원, 제도, 거버넌스 등에 대한 평가를 실시한다. 평가결과를 반영하여 수자원 정책 및 제도를 수정한다. 이 프로세스는 주기적으로 실시되며, 실행결과를 반영하여 관련 정책 및 법률이 수정되고 실행 대책이 보완된다. 수계 관리의 실제 적용에서는 정치 및 제도적 정황에서 수립된 관리 목표, 목적, 원칙들의 달성 및 준수 여부를 평가하고 이를 반영하여 관리 방법을 수정 및 보완하거나, 목적 및 원칙들을 수정한

다. 그림 3과 같이 수자원 운영은 계획을 수립하고 물 관리 환경에 따라 수자원을 적응적으로 관리하고 운영결과를 모니터링한 후 이를 평가하여 다음 수자원 계획 및 운영에 반영한다. 또한, 수자원 운영 결과에 대한 주기적인 평가를 실시하여 수자원 운영의 목표 및 목적 달성, 원칙의 준수, 계획 및 실행을 평가하며, 이를 반영하여 이들을 수정 및 보완한다. 이 프로세스내의 평가는 정치 및 제도적 정황에서 실시되는 평가결과를 반영하며 수자원 운영에 반영된다. 이와 같은 과정을 거치면서 기후변화 및 여건변화에 적응하며, 수자원 이용의 목표를 달성하기 위하여 수자원 개발 및 관리에 관련된 행위들이 실행된다.

5. 결론

최근 발생하고 있는 수자원과 관련된 사회적 갈등들은 지역이기주의, 수자원 사업의 환경 및 생태계에 대한 영향, 사업 편익의 분배 문제 등에서 비롯되고 있다. 이러한 사회적 갈등은 사회적인 합의를 통한 수자원 이용과 관리의 목표, 목적, 원칙들이 수립되지 않았기 때문에 발생하고 있으며, 해결책을 찾지 못하고 있다. 향후 수자원 개발과 관리는 여건들의 변화와 이들의 상호작용에 의해 불확실성이 커질 것이며, 사회적 선호도 변화와 기후변화는 수자원 운영에 영향이 클 것으로 전망되고 있다. 특히, 기후변화는 사회-경제 시스템, 생태계 시스템에 미치는 영향이 크므로 이의 영향을 완화시키면서 적응해야 한다. 따라서 수자원 사업의 원활한 진행과 사후 관리, 기존 시스템들과 조화, 새로운 패러다임의 등장, 기후 및 환경의 변화에 대응할 수 있는 적응형 수자원 관리의 도입이 필요하며, 기후변화에 대응하여 효과적인 수자원 관리를 위해서는 수자원 관리의 목표 및 비전, 대상 시스템 모델, 비용 및 재정계획, 조사 및 평가, 참여 및 대표성, 법률 및 제도 등이 필요할 것으로 사료된다.

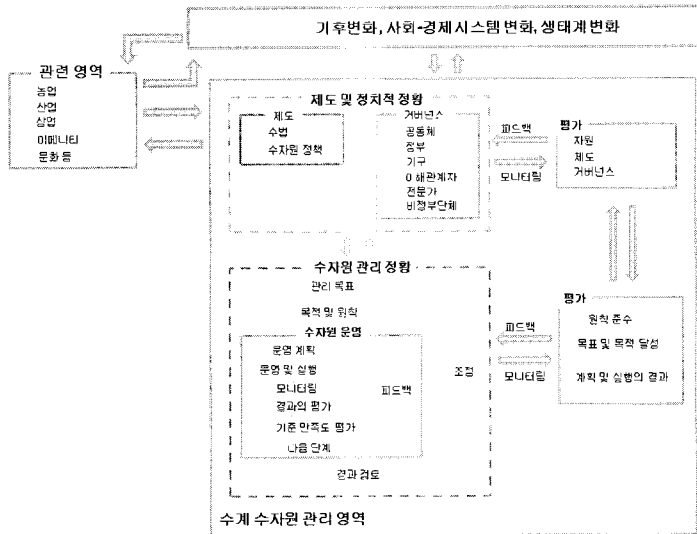


그림 3. 변화에 대응하기 위한 적응형 수자원 관리 프로세스

참고문헌

1. 권원태 (2007). 세계 기후의 미래 전망, Global warning and its socio-economic impacts, 한국기상학회, pp. 33-47.
2. 권혁조 (2005). 전지구적 태풍에 대한 소고, 한국수자원학회지, 38(6), pp. 51-55.
3. 문승록, 강태순, 남수용 (2007), 남해동부 연안의 해일발생 위험성, 기후변화 전문가 워크샵, 한국기후변화협의체.
4. 이명균 (2007). 변화를 위하여, Global warning and its socio-economic impacts, 한국기상학회, pp. 93-109.
5. 배덕효, 정일원, 이병주 (2007), A2 시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망, 한국수자원학회는 논문집, 40(12), pp. 921-930.
6. 한국건설기술연구원 (2007). 수자원 분야의 여건 변화를 고려한 수자원 계획 및 운영을 위한 적응형

수자원 관리에 관한 연구.

7. Everglades Restoration Plan(ERP) (2007). <http://www.evergladesplan.org>.
8. Freedman P. L., Nemura A. D., and Dilks D. W. (2004). Viewing total maximum daily loads as a process, not a singular value: Adaptive watershed management, Journal of Environmental Engineering, Vol. 130(6), pp. 695-702.
9. Intergovernmental Panel for Climate Change(IPCC) (2007). Summary forpolicymakers, A report of working group of the Intergovernmental Panel for Climate Change.
10. Panel on Adaptive Management for Resource Stewardship(PAMRS) (2004). Adaptive management for water resources project planning, The National Academies Press.