



수자원 부문의 기후변화 적응 전략

-미국 캘리포니아 주를 중심으로-



윤용남 |

(주)삼안 상임고문
고려대학교 명예교수
ynyoon@korea.ac.kr

1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화는 세계도처에서 여러 가지 물 관련 문제를 일으키고 있으며, 미국 내에서 가장 인구가 많고 경제규모가 크며 지정학적 및 기후학적으로 물 문제가 심각한 캘리포니아 주의 경우도 예외가 아니어서 기후변화는 이미 적설이라든지, 하천유량, 해수면등에 변화를 가져오는등 수자원에 막대한 영향을 미치고 있음이 감지되고 있다.

수자원개발 및 관리업무를 전담하고 있는 캘리포니아 주 수자원국(Department of Water Resources, DWR)은 변화하는 기후에 대응할 수 있는 역량을 강화하기 위해 여러 가지 노력을 기울이고 있으며, 최근 주정부나 지방정부의 물 관리 담당자로 하여금 기후변화에 적응하기위한 물 관리를 할 수있도록 하는 지침으로 일련의 기후변화 적응전략을 수립·제시한바 있다(State of California, 2008). 이들 적응 전략 중 일부는 인구증가나 생태계 복원, 홍수피해로 부터의 보호등을 포함하는 물 관련 비기후적 수요를 충족시키는 데에도 큰 도움이 될 수 있으며, 몇 가지 전략들은 바로 실무에 채택·적용될 수도 있겠으나 일부 전략들은 주민등 이해당사자들의 추가적인 이해와 협조를 필요로 하고 있다. 또한, 일부 전략들은 기존의 물

관리 조직과 자원으로 실행에 옮길수 있으나 많은 수의 전략들은 새로운 자원과 재정투자 및 기관간 협력을 필요로 하고 있다.

캘리포니아 수자원국은 캘리포니아 수법(Water Code)에 의해(Thomson/West, 2003) 매 5년마다 “주 수자원계획 보완(State Water Plan Update)”을 하고 있으며(State of California, 2003), 본고에서 소개되는 “수자원 부문의 기후변화 적응 전략”들은 2013년을 목표로 하는 “수자원 계획 보완 2013”에 반영되는 것으로 계획되고 있다.

수자원관리 측면에서 보면 우리나라의 수자원 특성은 지리적 및 기후적 차이 때문에 미국 캘리포니아 주와는 상당히 다르나 변화하고 있는 기후에 대응하여 수자원과 관련 자원을 가장 효율적으로 관리할 수 있는 새로운 접근 방법을 제안하고 있다는 측면에서 보면 여기에서 소개되는 적응전략들은 앞으로 기후변화에 적용할 수 있도록 우리나라의 수자원 관리 계획을 수립·추진해 나가는데 많은 도움이 될 수 있으리라 믿는다.

2. 다가오는 도전

지나간 20세기 동안 지구온난화에 따른 기후변화로 인한 수문현상들의 변동성 증가를 포함하는 수자원부문의 각종 영향들은 21세기 동안에는 더욱더 심화될 것으로 보인다(IPCC, 2008; 기상청/국토해양부, 2009). 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 전망에 의하면 캘리포니아 주가 위치한 미국

서부지역은 물 부족의 위험성이 특히 클 것으로 보고 있다(IPCC, 2007). 기존의 물 관리 시스템은 기후변동에 대응할 수 있는 어느 정도의 용량은 확보하고 있으나 극한 가뭄이나 홍수를 발생시키는 극한 기상사상들의 발생에 대비할 수 있는 용량으로는 부족하다. 캘리포니아 주는 미래의 용수공급과 홍수방어를 위해 역사적인 수문기록에 근거한 물 관리 시스템에 투자해 왔으며 현재에도 이들 시스템에 의존하고 있다. 그러나, 최근의 기후변화로 인해 과거의 수문학적 판단은 더 이상 미래에 대한 신뢰성 있는 가이드가 되지 못한다는 사실을 받아들여야 하게 되었다(The hydrology of the past is no longer a reliability guide to the future).

2.1 자연 적설 저류량의 손실

캘리포니아 주의 수자원관리에 가장 결정적인 영향을 미치는 기후변화 영향중의 하나는 시에라 네바다(Sierra Nevada) 산맥지역에 항상 저장되어 지표저수지의 역할을 하는 적설량의 심각한 감소라 할 수 있다. 현재 시에라 네바다 산맥지역으로부터 서서히 흘러내리는 연평균 용설량은 매년 봄철인 4월에서 7월까지 약 1,500만 acre-feet(약 185억m³)정도가 된다. 캘리포니아 주의 많은 수자원 시설들은 이들 봄철 유출량을 저장하였다가 강수량이 적은 여름철과 겨울철동안 용수를 공급할 수 있도록 설계되어 있다. DWR은 시에라 네바다 산맥지역의 적설량은 2050년까지 역사적인 연 평균치의 약 25~40%가 감소될 것으로 전망하고 있다. 또한, 기후변화는 강설보다는 강우를 발생시켜 저지대에서의 강설량 자체를 감소시킴으로서 총 적설저류량을 감소시킬것으로 예상되고 있다.

2.2 가뭄

기온의 상승은 강수 및 유출의 변화와 더불어 가뭄의 심도와 발생빈도를 더욱 증가 시킬것으로 보고 있

다. 하천이나 호수등의 지표수에 주로 의존하는 지역은 기후변화에 따른 유출량의 변화로 크게 영향을 받을 것이고, 물 수요의 상당부분은 지하수에 의존하게 될 것이다. 도시화로 인해 자연수림이 침범되면 산림은 각종 스트레스를 받게 되고, 가뭄시에는 토양이 건조한 상태에 있게 되어 산불 발생의 심도와 빈도가 높아져서 식생에 변화를 가져오게 되며, 마침내는 산림의 용수공급 및 저류용량 확보 기능에 큰 장애를 가져오게 될 것이다.

기후변화는 용수수요에도 영향을 미치게 된다. 기온이 높아지면 증발산률이 높아져서 성수기가 연장되어 농작물의 관개나 도시지역의 경관유지 및 환경용수 수요의 증가를 가져오게 된다. 또한, 토양수분과 지표면 유출량의 감소는 환경이나 연간 내리는 자연강우량에만 의존하는 기타 용수 사용자에게는 부정적인 영향을 미칠 수밖에 없다.

2.3 홍수

강설량은 용수공급이나 환경보전 목적에 대단히 중요하지만 하천으로의 눈녹음 유출(snowmelt runoff)의 시기 또한 대단히 중요하다. 기후변화로 인한 강설라인(snowline)의 고도상승(기온이 높아지면 더 높은 고도에서 강설현상 발생)은 시에라 네바다 유역에서의 침투홍수량을 크게 할 것이고 발생빈도가 높은 홍수(예:10년 빈도 홍수)의 발생은 잦아질 것이다. 적설량의 감소 및 눈녹음의 가속화에 따라 더 큰 강우강도가 전망되며 이로 인한 직접 유출로 인해 홍수범람이 우려되고 있다. 유역의 식생 및 토양 수분 조건의 변화는 유출과 지하수 함양 패턴에 변화를 가져올 것이다. 또한, 변화된 하천유량과 유속으로 인해 토양 침식 패턴도 달라져서 하도 특성에 변화가 생길수 있고, 댐 내에는 퇴사량이 증가하여 생태 서식처와 수질에까지 영향을 미칠수 있다. 또한, 기후변화로 인한 산불의 발생빈도와 강도의 증가 가능성과 함께 산불 때문에 홍수발생 건수가 더 많아질 위험성이 있으며 이로 인한 토사유출 부하량의 증



가와 수질악화가 예상된다.

미국 연방위기관리국(Federal Emergency Management Agency, FEMA)은 홍수보험 목적으로 전통적인 100년 빈도 홍수를 사용해 왔다. 기후변화로 인해 캘리포니아 주의 수문 특성도 변하고 있으므로 현재에 100년 빈도 규모의 홍수는 앞으로는 더 자주 발생하게 되어 모든 지역이 현재보다 더 큰 홍수재해 위험에 직면하게 될 것이다. 뿐만 아니라, 침투홍수량과 강수량이 시간에 따라 변화함에 따라 기후변화는 홍수보험의 기준 홍수량으로 삼고 있는 100년빈도 홍수량을 결정하는 절차인 홍수빈도 분석의 전제조건인 홍수량 시계열의 “정상성(정상性, stationarity)”을 부정하는 결과를 가져온다. 여기서 정상성이란 강수량이나 홍수량등 수문 시계열의 장기간 통계 특성치(평균, 표준편차, 왜곡도등)가 시간에 따라 변화하지 않고 거의 일정함을 의미하는바, 기후변화가 현실로 나타다면 수문 시계열은 정상성을 잃게 되어 비정상 시계열(non-stationary series)이 되고 말기 때문에 빈도 분석의 적용이 어렵게 되는 것이다. 따라서, 수자원 계획 담당자는 댐이나 제방, 방수로, 첩수로, 그리고 내배수시설등 각종 홍수 방어시설물의 설계, 운영, 조작등을 위한 새로운 치수안전도 기준의 설정에 대해 연구·검토할 필요가 있다.

2.4 수질

하천유량의 발생시기와 따뜻해지고 있는 대기온도는 수질과 여러 가지 목적의 물 사용에 여러 가지 영향을 미치게 된다. 한가지 극단적인 사항을 예로 들면, 큰 홍수의 발생은 토양침식을 크게 일으켜 탁도를 높힘으로서 오염물질의 농도를 증가시키게 되어 정수공장의 운영에 영향을 미치게 되며, 홍수 범람은 여러 수공 구조물들의 정상적인 기능을 위협할 수도 있다. 또다른 극단적인 사례는, 여름이나 겨울철 갈수유량이 오염물질의 농도를 크게 증가시킨다는 것이다. 이와같은 하천유량의 시간적 변동성을 고려하여

방류계획과 비점오염원 관리를 위한 새로운 접근방법을 개발할 필요가 있다. 또한, 수온이 따뜻해지면 많은 어류종이 위해를 입게 되므로 저수지로 부터의 차가운 물의 방류가 필요하다. 따뜻한 물은 생물학적 및 화학적 반응 과정을 가속시켜 조류나 미생물의 번식을 증가시키고 용존 산소를 고갈시키는등 수처리 공정에 여러 가지 나쁜 영향을 미친다. 또한, 산불의 강도와 발생빈도의 증가는 유역의 특성은 물론이고 식생이나 유출 및 수질에 영향을 미치게 된다.

2.5 해수면 상승

해수면은 상승하고 있으며 이는 앞으로도 계속될 것이라는 전망이다. 그러나, 서부 남극지방과 그린랜드에서의 빙상(氷床)의 해동과 바다에서의 갑작스러운 변화 가능성에 대한 불확실성 때문에 상승률이 정확히 얼마나 될 것 인가는 현재로서는 알 수가 없다. 최근의 각종 연구결과에 대한 검토에 따르면 캘리포니아 해안선을 따른 2100년까지의 해수면 상승량은 온실가스 배출시나리오와 예측 기후모델에 따라 변동폭이 크지만 약 7~55인치(18~140cm)로 전망하고 있다(State of California, 2008). 해수면의 최소 상승량인 18cm를 고려하더라도 해일의 위험과 해안지역 주민 및 기반시설에 대한 홍수범람 위험은 막대할 수 있다. 해수면 상승은 저지대에서 운영되고 있는 하수처리장과 델타지역의 제방 손괴위험과 그로인한 막대한 피해를 예상할 수 있다. 해안 제방의 붕괴가 없더라도 델타지역의 용수공급과 수중 생태 서식처는 염수침입의 영향을 받게 될 것이다. 염수침입으로 인해 음용수와 농업용수의 수질은 저하되고 생태계의 조건 또한 악화될 것이다. 따라서, 상류 저수지로 부터의 담수 방류로 염수의 적정 염도 수준을 유지할 수 있도록 해야 할 것이며, 또한, 해수면 상승은 해안지역 대수층으로의 염수침입 결과를 가져올 것이며 이로 인해 해안지역 사회에 음용수 공급을 하는데 어려움을 주게 될 것으로 전망되고 있다.

3. 피할수 없는 대처

캘리포니아 주의 기존 수자원 관리시스템은 용수 공급, 위생관리, 수력발전, 위락활동, 홍수방어등의 기능을 제공함으로써 100년이 넘는 기간 동안 캘리포니아 주의 경제 활성화를 위한 기반시설의 역할을 해왔다. 주의 수자원은 현재에도 스트레스를 받고 있지만 기후변화로 인한 추가적인 스트레스는 깨끗하고 신뢰도 높은 각종 용수공급을 위한 경쟁을 치열하게 만들고 말 것이다. 온실가스 배출량을 감소시키고 청정에너지의 사용을 확대하기 위한 주정부의 역할은 계속되어야 할 것이지만 캘리포니아 주의 물 관리 기관들은 예상되는 변화에 대처하기 위한 기후변화 적응 전략(adaptation strategies)에 집중해야 할 입장에 있다. IPCC의 제4차 평가보고서(IPCC, 2007)에서는“적응대책은 과거의 온실가스 배출 때문에 이미 피할수 없게된 지구온난화로 인한 영향에 맞추어질 필요가 있다(Adaptation will be necessary to address impacts resulting from the warming which is already unavoidable due to past emissions.)”라고 기술하였다. 기후변화에 대한 이해가 더욱 개선되면서 캘리포니아 주의 수자원 관리 조직에 주어지는 도전은 물의 확보를 쉽게 하며, 물로 인한 위험을 줄이고 지속가능성을 증가 시킬 뿐 아니라, 홍수관리시스템과 생태계를 개선 할 수 있는 전략을 개발하고 실행에 옮기는 것이라 할 수 있다.

다행하게도, 기후변화가 가져다준 각종 위험을 감소시키는데 도움이 되는 여러 가지 전략들이 존재하며, 기후변화 적응에 성공 하려면 이들 적응전략들은 주정부나 지역 혹은 지방 정부 차원에서 효과 극대화를 위해 잘 협조되어야만 할 것이다. 단일 프로젝트나 단일 전략으로는 기후변화로 인해 제기되는 여러 가지 도전에 적절히 대처할 수 없으며 적절한 타협으로 의사결정이 이루어져야 할 것이다. 요약하면, 기후변화 적응을 위한 종합적인 물 관리 실천계획을 수립하고 투자계획을 세워서, 물 관리자에게 정보를 제공하고 수자원 관리 시스템의 다양성과 안정성을 확

보하는 것이 미래 기후의 불확실성에 대비하는 길임에는 틀림이 없어 보인다.

4. 수자원 부문의 기후변화 적응 전략

캘리포니아 주 정부가 기후변화에 대처하기 위해 고려하고 있는 수자원 부문의 적응 전략은 투자전략, 지역차원의 전략, 주 정부 차원의 전략, 그리고 수자원 관리 및 의사결정 능력의 개선 전략등 4가지 부문으로 구분되며, 10개의 개별 기후변화 적응 전략으로 구성 되어 있다.

4.1 기후변화 적응 투자 전략(Investment Strategy)

기후변화는 점점 노후화 되어가고 있는 수자원 기반시설과 증가하는 인구 때문에 생기는 여러 가지 문제들을 더 악화시키게 되므로 기후변화에 제대로 적응하기 위해서는 지속적인 투자가 필요하다. 투자재원은 단기채권 발행등에 의하는 것 보다 장기적인 재원 확보 계획을 수립함으로써 예상되는 장래 지출의 규모와 수혜자 그룹의 범위, 재원확보 책임기관등을 분명히 해야 한다.

■ 전략 1 : 지역통합 수자원 관리를 위한 투자재원의 조달

주 의회는 주 전체에 걸친 수자원 부문의 사업을 지속적으로 실행해 나가는데 필요한 연속적이고 안정적인 세입원을 찾기 위해 주 정부 및 지방 정부의 재정 메커니즘에 대한 공식적인 평가를 하여야 한다. 확실하고 연속적인 재정지원을 필요로 하는 지역통합수자원 관리(Integrated Regional Water Management, IRWM)사업에는 지역통합수자원계획의 수립과 홍수관리용 시설물들의 검사, 유지관리, 보수 및 재개발, 수문관측시스템의 운영, 그리고 물 관련 기후변화 적응에 관한 연구사업등이 포함된다.



4.2 지역차원의 전략(Regional Strategies)

캘리포니아 주는 시에라 네바다 산악지역으로부터 해안지역에 이르기까지 지역별로 다양한 지형학적 특성을 가지므로 기후특성 또한 다양하다. 따라서, 기후변화로 인한 환경적 및 경제적 영향은 지역에 따라 독특한 특성을 가질 것이므로 지역별로 적절한 적응 대책이 수립되어야 한다.

■ 전략 2 : 지역통합 수자원 관리 잠재성의 최대한 개발

지역통합수자원관리 계획은 물 수요관리와 공급관리 대안들의 적절한 조합과 수질대책을 결정하는 종합적인 접근방법으로, 경제개발과 환경의 질, 그리고 다른 사회적 목표 달성을 위한 최대 편익을 가장 저렴한 비용으로 가능하게 해준다(윤용남, 2008). 뿐만 아니라, 이 방법을 교통이나 토지이용등을 위한 지역 계획에 연계하여 적용하면 기후변화에 대처하기 위한 지역차원의 적응전략의 기초를 마련할 수 있다.

주 정부는 재정적 및 기술적 지원을 통해 지방 정부가 변화하는 기후에 적용할 수 있는 수자원 관리를 할 수 있도록 다음과 같은 IRWM계획 수립 및 실행 노력을 지원해야 할 것이다.

- 모든 IRWM 계획에는 지역 지하수 저류량, 지역 지표수 저류량, 기타 용수 공급량(재순환 도시용수, 도시유출, 유역변경 수자원등)을 조합하는 방법을 개선하기 위한 전략을 제시해야 할 것이다.
- 모든 IRWM 계획에는 변화하는 기후에 적응하기 위해 다음과 같은 아주 구체적인 항목이 포함되어야 한다.
 - ▶ 기후변화와 관련되는 장기적인 위험증가와 불확실성에 대한 해당 지역의 취약성 평가
 - 통합 홍수관리 구성요소
 - 장래 가뭄의 발생빈도와 지속기간을 20%정도 증가시킨 가뭄 구성요소
 - ▶ 보다 공격적인 수자원 보전과 효율성 제고 전략

- ▶ 토지이용 정책과 수자원 정책의 통합적 운영
- 유역에서의 침투와 느린 유출을 증가시키고 수질을 개선하며, 지표저류량을 유지하는등 자연적인 물 순환과정을 복원 시키도록 하고,
- 물 수요를 줄이고, 빗물과 도시유출수를 저류하여 재이용하고, 용수공급 신뢰도를 증가 시킬수 있는 저영향 개발을 장려
- ▶ 가뭄등과 같은 비상상태에서 용수공급시설을 공동 이용하기 위한 지역내 대상 물 수요처에 대한 계획을 수립
- 대규모 정수장등 수자원 시설과 하수처리시설등에 대해서는 온실가스 방출 제한 측면에서 탄소흔적(carbon footprint)에 대한 평가를 실시해야 한다.

■ 전략 3 : 물 사용 효율의 공격적 개선

물의 효율적 사용은 물 관리의 기본이며 기후변화에의 적응수단 이다. 뿐만 아니라, 물 공급에는 에너지가 필요하며, 에너지의 사용은 온실가스를 배출하게 되므로 물의 효율적 사용으로 에너지 사용을 줄이는 것은 기후변화의 완화(mitigation)에 도움이 될 수 있다. 물의 효율적 이용, 즉 물의 보존(conservation)은 물 수요를 줄여서 하수 방류량을 감소시킴으로서 하수 처리를 위한 에너지 소모를 줄여 온실가스 배출을 줄이는 결과를 가져온다. 물의 효율적 이용은 기후변화로 인해 발생할 수도 있는 물 부족을 해소해 줄 수 있으며, 이는 물 부족으로 인한 경제적 및 환경적 영향을 감소시키는 결과를 가져다준다. 캘리포니아 주의 물 사용 효율의 개선을 위한 대책을 살펴보면 다음과 같다.

- 캘리포니아 주는 물 관리 관련 산하기관들이 2020년까지 인구 1인당 연간 물 사용량을 20% 정도 감소시킬수 있는 전략을 개발하고 있다.
- ▶ 2010년까지 모든 도시 물관리플랜(Urban Water Management Plan)에는 California Urban Water Conservation Council

(CUWCC)에서 수립한 경제적이고 타당하며 법적으로 결정된 최적관리기법(Best Management Practices, BMPs)의 실행과 이를 위한 재정확보 방안이 포함되도록 하고 있다.

- ▶ 모든 지방 정부는 주 정부의 Model Water Efficient Landscape Ordinance(MWELo)를 법으로 채택하도록 되어있다. Model Ordinance는 새로운 개발만을 고려하므로 지방 관서는 기존 경관시설에의 물 사용을 감소시키기 위한 물 절약 프로그램을 실행에 옮기도록 하고 있다.
- ▶ 지방 혹은 지역의 각종 물 사용 효율화 프로그램에서도 물과 에너지 소비를 가급적 줄일수 있는 방법들을 강조해야 한다.

위에서 언급한 주 산하 물 관련 기관들은 기후변화 실천팀(Climat Action Team)과 CUWCC등과 협력하여 2009년 캘리포니아 수자원 보완계획(California Water Plan Update 2009)에 도시지역 물 사용 효율화 방안에 대한 추천사항을 포함하도록 하고 있다.

- 농업관련 기관 및 단체들은 모든 효율적 물 관리 방법(Efficient Water Management Practices, EWMPs)의 적용으로 물 수요의 감소와 배수 및 회귀수의 질 개선, 그리고 물 관리 계획의 실행에 관한 보고를 위해 노력하도록 하고 있다.
- 물의 재순환은 가뭄을 극복하기 위한 물 관리 전략중의 하나이며 일부지역에서는 에너지 효율적인 대안이 될 수도 있다.
- ▶ 이들 지역에서는 하수 및 물 관리 기관들이 공공 보존을 보호하는 조건으로 재순환수의 사용을 촉진하는 정책이나 시설계획을 개발해야 한다.
- ▶ 기존하는 허가기관이 기준에 맞추어 물의 재순환을 최적화 할수 있도록 관련기관들 간의 협력이 이루어 질수 있도록 해야 한다.

4.3 주 정부 차원의 전략

현재의 기존 수자원 관련시설들은 용수공급, 홍수방어, 환경보전, 수질관리, 수력발전, 위락활동등 기존의 경쟁관계에 있는 목표를 전부 충족시키지는 못하고 있다. 기후변화로 인해 가용 수자원은 더 부족해 질것이므로 이들 경쟁관계에 있는 이해관계간 갈등은 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서, 댐이나 용수로, 홍수방류수로, 하천제방들은 기후변화로 인해 발생하는 변동성의 증가에 적응할 수 있도록 수정되고 보강되어야 한다. 또한, 기후변화 영향에 대한 전망은 여러 가지 불확실성을 가지기 때문에 수자원 시스템의 운영과 관련해서는 상당한 융통성이 기본적으로 고려되어야 한다.

■ 전략 4 : 통합홍수관리의 실천 및 촉진

캘리포니아 주의 중앙부계곡(Central Valley) 지역에서의 홍수범람 위험은 현재에도 엄청난 수준이며, 이 지역에 살고 있는 수백만, 수천만명의 인구는 하천제방에 의존하고 있으나 기후변화로 인한 보다 강한 겨울철 호우로 인한 홍수범람 위험은 증가될 것으로 예상되므로 홍수방어시스템은 공공의 안전과 경제 및 생태계 유지를 위해 현재보다 크게 보강되어야 할 것으로 보고 있다. 물 관련 재해 대처를 위한 일본의 기후변화 적응 대책(윤용남, 2009)에서 상세하게 살펴본 바와 같이 기후변화에 적응하기 위한 국가차원의 종합적인 홍수방어시스템 구축은 시급하며, 이를 위한 캘리포니아 주 정부의 대책 방향을 살펴보면 다음과 같다.

- 홍수관리시스템은 자연적인 홍수터 형성과정을 더 잘 이용해야 한다. 즉, 홍수관리는 이용되지 않고 있는 개활지나 농업용지, 야생동물 서식지, 기타 저지대 토지등에 대한 유역관리와 통합되어 운영되어야 하며, 이렇게 함으로서 침투홍수량을 감소시키고, 토사유출을 줄이며, 홍수류를 임시 저장하고, 지하 대수층을 함양하며, 환경유



량을 복원 시킬수 있도록 해야 한다. 또한, 기존 수자원 관련 시설물의 운영은 어떤 한개 기관에 의해서 개선될 수 있는 것이 아니라 여러 관련기관들 간의 긴밀한 협조 아래 운영되어야만 최대 편익을 보장 받을 수 있게 되므로 밀접한 협력관계의 구축이 필요하다.

- 주 정부는 System Reoperation Task Force 를 주 정부와 관계 중앙정부기관(USBR, Corps of Engineers 등), 이해당사자들을 포함하는 관련 인력으로 구성하여 기후변화 영향을 고려한 다음과 같은 분석을 실시해야 할 것이다.

- ▶ 용수공급, 홍수조절, 수력발전, 수질관리, 어도 등 기타 생태계 유지등을 위한 시스템의 재운영 (System Reoperation)에 들어가는 비용과 편익, 그리고 영향등의 정량화
- ▶ Central Valley의 댐/저수지들에 대한 미 육군 공병단(Corps of Engineers, COE)의 운영 가이드라인의 개선을 지원
- ▶ 주요 하천에 대한 홍수빈도 분석의 재수행을 지원
- ▶ 목적별 수요유량의 수정 필요성에 대한 평가
- ▶ 저수지 운영에 적용될 예보기반 운영 기법의 연구지원
- ▶ 지구별 비용과 편익을 상세화 하는 하천 유역 차원의 분석 실시
- ▶ 편익을 제한하고 있는 주요 조직상의 장애 요인 규명

- 캘리포니아 주의 용수공급과 홍수관리 업무를 조정하기 위해 주 정부와 연방정부 산하의 주요 관련기관(USBR, COE등)들은 공동운영센터 (Joint Operation Center, JOC)를 이미 설립 운영하고 있다. 장래의 기후변화로 인한 여러 가지 문제에 성공적으로 대처하기 위해 JOC는 물 이동을 포함하여 개별적인 사상뿐만 아니라 계절별 혹은 경년별 수자원 시스템의 운영을 위한 의사결정을 보다 잘 지원하기위해 여러 가지 수

단의 개발과 관측활동을 확대해 나가야 할 것이다. 또한 JOC는 홍수와 가뭄등이 발생하는 비상 시기에 기관간 정보교환과 협력을 개선할수 있도록 그 업무가 보완될 필요가 있다.

- 2012년 1월 1일까지 DWR(캘리포니아 주 수자원국)은 Central Valley Flood Protection Plan(홍수방어계획)을 수립할 계획으로 있다. 이 계획은 기후변화로 인해 예상되는 영향들을 고려하여 통합홍수관리시스템을 개선하기 위한 각종 수단 및 조치 방안을 포함하게 될 것이며, 다음과 같은 사항을 포함하여 보다 발전된 홍수 방어와 환경보전을 위한 전략을 제공하게 될 것이다.
- ▶ 홍수비상대처 준비, 대응, 대피, 복구등을 위한 조치
- ▶ 도시지역 하천제방의 부담을 감소시키고 생태 서식처 보존, 농경지 보호, 개활지의 확보등을 위해 홍수통로(floodway corridors)의 확장 및 사용증가 노력
- ▶ 도시지역의 홍수방어를 위한 치수안전도는 200년 빈도로 상향조정할 것을 추천
- ▶ 이연제(setback levees)의 사용, 홍수터의 Zoning, 공공안전의 확보를 위한 토지취득, 홍수터저류, 서식처 보전등의 강화
- ▶ 잔여위험 해소를 위한 홍수보험 요건의 강화
- ▶ 광범위한 홍보 및 대민교육
- ▶ 홍수관리와 타 수자원·환경부문 관리의 통합 운영등

- 홍수피해위험에 처해있는 모든 시·군은 홍수비상대처 준비, 대응, 대피, 복구를 위한 계획을 수립·채택하고 실행에 옮기며, 주기적으로 평가해야 한다.

- 지방 정부는 홍수위험을 감소시킬 수 있는 토지이용정책을 실행에 옮겨야 한다.

- ▶ 지역의 토지이용 기관은 기후변화로 증가되는 홍수위험을 반영하기 위해 기본계획(General

Plans)을 보완.

- ▶ 지방 정부는 홍수터가 최소 200년 빈도 이상의 치수 안전도를 가지지 못할 경우 미개발된 홍수터의 외부지역에 대하여 새로운 개발을 허용.
- ▶ 지방 정부는 유출수를 침투시키고 저장할 수 있도록 저영향개발(low-impact development) 기법을 사용.
- ▶ 지방 정부는 지방건축법에 내홍수설계(flood-resistant design)를 하도록 규정.

■ 전략 5 : 생태계의 개선 및 지속적 유지

신뢰할 수 있는 용수공급과 원만한 홍수방어는 생태계의 지속가능성과 밀접한 관계를 가진다. 공공의 안전과 생태계를 위한 적응능력을 제고하기 위해 용수공급과 홍수관리 관련 사업들은 생물학적 다양성과 자연 생태계의 순환과정을 잘 유지하고 증진시킬 수 있도록 추진해 나가야 한다. 용수공급과 홍수관리시스템은 생태계의 기능을 유지하고, 증진하며, 복원시킴으로서 극단적인 자연현상의 발생으로 인한 피해를 경감시킬 수 있고 빨리 회복할 수 있도록 하는 통합 시스템을 구축할 때 보다 지속가능하고 경제적인 시스템이 될 수 있다. 환경에 미치는 기존하는 비 기후적 스트레스를 감소시킴으로서 생태계는 기후변화가 가져올 새로운 스트레스와 불확실성에의 적응능력을 제고할 수 있을 것이며, 주 정부의 대책방향을 살펴보면 다음과 같다.

- 물 관리시스템은 하천과 하천연변 혹은 습지 생태계와 관련된 동식물종들을 위한 인접한 서식처와 이동통로들을 보호하고 재구성해 줄 수 있어야 한다. 전술한 바의 IRWM과 지역 홍수관리 계획은 생태계 이동 통로의 연결과 변화하는 기후에 적응할 수 있도록 생물 다양성과 탄력성의 증가를 가능케 하는 자연적인 수증 및 지상 서식처의 복원을 도모할 수 있어야 한다.
- 홍수관리시스템은 하천과 그의 역사적 홍수터 간의 수문학적 연계성을 재구성하도록 할 필요

가 있다. 이선제(setback levees)나 첩수로(bypasses)등은 홍수류를 저류하여 천천히 방류하게 하고 지하수를 함양케 하며, 생태계에 서식처를 제공하기도 한다. 또한, 식생 피복된 홍수터 통로내의 탄소포집(carbon sequestration)은 온실가스 배출량의 감소에 도움이 될 수도 있다.

- 주 정부는 댐 소유주라든지 연방 자원관리기관 혹은 민간 이해당사자들과 함께 산란을 위해 유역 상류로 거슬러 올라가는 연어등과 같은 물고기(anadromous fish)의 번식기회를 평가할 필요가 있다.
- 주 정부는 해수면 상승에 적응할 수 있는 해안습지를 서식처로 제공하고 있는 샌프란시스코만과 샌오와퀸(San Joaquin) 델타의 경계지역에 있는 토지보호를 위한 우선순위를 전략적으로 결정해야 할 것이다. 이와같은 토지는 하구 생태계의 기능을 유지시키는데 도움이 되며, 폭풍우에 방패역할을 함으로서 해수면 상승과 폭풍해일로 발생하는 홍수피해로부터 인명과 재산피해를 방어하는 역할을 하게 된다.
- 자연적인 물과 눈의 저장장소로서의 역할을 하는 상류유역의 삼림과 초원시스템을 보호하고 개선할 필요가 있으며, 이는 물 공급 신뢰도를 높이고 수질을 보호하며 고지대 서식처와 생태 이동 통로를 보전하게 될 것이다.

■ 전략 6 : 수자원의 추가확보와 지표수 및 지하수자원의 연계관리 강화

기후변화에 따른 도전에 대처하기 위해서는 지표수와 지하수자원은 연계 관리되어야 한다. 또한, 지역간 물 이동을 가능하게 하고, 물의 공급과 사용에 있어서의 일별 혹은 계절별 변동성이나 불확실성에 대응하여 홍수관리나 수질관리뿐 아니라 수자원 시스템의 기능을 개선하기 위해서는 추가적인 수자원 확보와 공급수단을 필요로 한다.

역사적으로 볼 때 캘리포니아 주는 가뭄기간동안



주로 지하수에 의존해 왔으며, 많은 대수층은 이미 오염되어 있는 상태이어서 기후변화에 면역성을 가지기 어렵다. 기후변화는 가뭄을 더 악화시킬수 있으므로 지하대수층의 효율적 관리는 추가적인 과잉양수를 방지하는 방향으로 추진되어야 한다.

지표수 저류용 저수지의 보다 개선된 관리는 변화하는 기후조건하에서 각종 편익을 보장받을 수 있다. 즉, 아주 큰 침투홍수량을 감당한다든지, 물고기에게 찬물 방류를 가능케 한다든지, 음용수 수질을 보호하기 위해 댐 방류에 의해 해수 침입을 억제 한다든지, 그리고 청정 수력에너지를 생산, 용설량을 대체할 수 있는 지표수의 저장등이 바로 이들 편익에 속한다. 다음은 캘리포니아 주 정부나 지방 정부 차원에서 수자원의 추가 확보와 지표수-지하수 연계 관리를 위해 고려하고 있는 대책 방향이다.

- 주 정부는 지표수와 지하수 저장량을 증가시켜 가용 수자원량을 추가 확보해 나간다.
- DWR은 추진중인 지표수 저류시설 관련 프로젝트들에 기후변화 영향을 미리 반영할수 있도록 관계 연방정부 산하기관 및 지방 정부와 긴밀하게 협조해 나간다.
- 지방 정부들은 지하수관리와 관련하여 다음과 같은 점에 유의한다.
 - ▶ 지하 대수층을 물 은행처럼 효율적으로 사용
 - ▶ 지하수 수질을 보호하고 개선
 - ▶ 해수면 상승에 따른 염수 침입을 방지
 - ▶ 지하수의 취수 및 지하수위를 모니터링
 - ▶ 타 지역과의 지하수 연계관리를 위한 계획수립에 협조
 - ▶ 물 공급에 있어서의 불가피한 갈등을 해소
 - ▶ 지속가능한 지하수 사용을 위해 노력
- 지방의 토지이용 관계기관은 지하수자원의 보전을 위해 지하수 함양지역의 자연적 기능을 보호할 수 있도록 관련 조례등을 제정·운영하여야 한다.

■ 전략 7 : 델타지역의 용수공급, 수질, 생태계등의 유지를 위한 활동 강화

Sacramento-San Joaquin 델타지역은 2,500만 명의 캘리포니아 주민을 위한 수자원의 공급원으로 아주 다양하고 복잡한 생태계를 형성하고 있으며, 여러 군소 도시들의 생활터전이기도 하다. 이 델타지역은 현재의 관리 노력에도 불구하고 지속가능하지 못한 것으로 판단되고 있으며, 장차 기후변화로 인한 기온의 증가와 해수면의 상승등은 델타의 지속가능성을 더욱더 위협할 것으로 보고 있다. Delta Vision Task Force는 2007년말에 Delta에 대한 전망 보고서(Delta Vision Report)를 내어 놓았으며, 비전의 실행을 위한 각종 제안을 포함하는 전략계획서를 작성중에 있다. Delta Vision 이외에도 Bay-Delta Conservation Plan(BDCP), Delta Risk Management Strategy(DRMS), Delta Regional Ecosystem Restoration Implementation Plan(DRERIP)등의 계획수립 노력이 진행되고 있다.

따라서, 주 정부와 지방 정부 및 이해당사자들은 서로 협력하여 델타지역의 생태계와 용수공급 신뢰도의 향상을 위해 수립중인 이들 4가지 계획에 박차를 가함으로써 델타지역이 기후변화에 잘 적응해 나갈 수 있는 지속가능한 지역이 되도록 노력하고 있다.

4.4 수자원 관리 및 의사결정 능력의 개선

캘리포니아 주내 여러지역에 미치는 기후변화 영향을 전망하기 위해서는 주내 자연환경에 대한 각종 자료를 수집하여 일관성 있고 종합적인 분석을 하여야 한다. 과거기록과 현재의 조건, 앞으로의 성향등에 대한 분석은 일기, 기후, 물 공급 및 홍수범람 관련 변수들에 대한 예보를 제공하는데 도움을 준다. 불행하게도 이들 정보들을 측정하는 계기나 센서들은 현재로서는 크게 부족하다. 따라서, 사용자에게 의한 운영이나 정책 결정을 지원하는데 필요한 관측망 구축과 자료의 분석 및 축적, 그리고 예측수단의 개발을 위한 전략적인 투자는 필수적이다. 또한, 기후변

화 영향을 이해하는데 꼭 필요한 단절되지 않은 기록들을 보존하기 위한 이들 모든 부문에의 투자 재원확보는 반드시 필요한 것이다.

■ 전략 8 : 수자원 관련 모니터링, 자료분석 및 관리방법의 개선

장기간에 걸친 기후변화의 속도와 규모에 내재하는 불확실성을 감소시킬 필요가 있다. 한가지 예로, 기후변화에 대단히 취약한 지역에 대한 현재의 수문 예측망은 크게 불비 되어 있는 것이 현실이다. 충분한 광역의 모니터링 망에 의해 수집되는 신뢰도 높은 자료의 분석과 해석은 기후변화 영향에 대한 정확한 전망과 실시간 시스템 관리를 가능케 해주며, 또한 적응전략을 평가하고 수정할 수 있게 해준다. 다음은 각종 기후변화 영향의 모니터링, 자료분석, 관리 방법등의 유지와 개선 및 관리를 위해 필요한 사항과 주 정부의 계획을 요약하고 있다.

- 기후변화를 모니터링하고 전망하는데 사용될 자료의 확보를 위해서는 기온이라든지 강수량, 증발산량, 바람, 강설량, 식생피복, 토양수분, 유출량등 수문 기상 자료에 대한 일관성 있고 신뢰도 높은 예측망의 구축이 필요하며, 높은 표고에서의 눈과 비의 전이대에서 발생하는 변화에 대한 추가적인 관측을 필요로 한다.
- 캘리포니아 주의 계절적 및 지형적 강수분포를 결정하는 대기순환 과정을 이해하기 위해 대기 조건에 대한 개선된 관측이 필요하며, 이들 자료들은 기후 모델링 기술자로 하여금 지역규모에서의 미래의 비와 눈이 내리는 패턴에 관한 전망을 보다 더 정확하게 할수 있도록 할 것이다.
- 물의 이용현황에 대한 정확한 정보수집은 수자원 계획과 관리를 개선하는데 도움이 된다. 캘리포니아 주의 물 관련 기관(DWR, Water Boards, Public Health Department, California Bay-Delta Authority등)들은 2009년말 까지 물 이용현황 측정 D/B와 보고서

스텝에 대한 타당성 조사를 종료할 계획으로 있다.

■ 전략 9 : 해수면 상승 대응계획과 적응 방안

기후변화로 인한 여러 가지 영향중 해수면 상승은 얼음판 동역학(ice-sheet dynamics)에 관련된 불확실성 때문에 계획측면에서 가장 어려운 문제 중의 하나이다. 뿐만 아니라, 해수면 상승은 지각변동이라든지 대기조건등과 같은 지역인자에 크게 의존한다. 캘리포니아 주의 Sacramento-San Joaquin 델타지역은 평균 해수면보다 낮은 섬으로 구성되어 있고 이들 섬은 제방으로 보호되고 있으므로 해수면 상승은 이들 홍수 방어시설들에 큰 위협이 되고 있으며 염수로 인한 수질오염도 문제가 되고 있다. 또한, 해안지역의 물 관리와 홍수관리를 위한 기반시설 뿐만 아니라 해안 및 만에 위치한 습지나 해변 및 공원등의 국지적 혹은 지역적 투자는 해수면이 상승하는 지역에서는 큰 취약성을 가진다. 다음은 캘리포니아 주 정부가 해수면 상승에 대응하기 위해 고려하고 있는 계획과 적응 대책의 방향이다.

- 주 정부는 지방이나, 지역, 그리고 주 전체에 걸친 단기 수자원 계획의 수립 목적으로 장래 해수면 상승량의 범위에 대한 전망치를 예측할 것이며,
- DWR과 Resources Agency는 장기적인 해수면 상승량의 산정을 위한 전문가 지침을 제공함으로써 캘리포니아 주의 구체적인 수자원 계획 이슈에 적용할 수 있도록 할 것이며,
- 장기적인 해수면 상승시나리오를 개발하여 대응 전략을 California Water Plan Update 2013에 반영 할수 있도록 할 것이다.

■ 전략 10 : 핵심적인 기후변화 영향과 적응대책 관련 연구 항목의 발굴 및 연구 재원 확보

기후변화가 수자원에 미치는 영향 및 적응대책에 대한 보다 핵심적인 연구개발은 기후변화의 불확실성



의 범위를 좁혀줄 수 있고, 물과 기타자원의 취약성에 관한 집중적인 분석을 가능하게 할 것이다. 또한, 이러한 연구는 새로운 수자원 프로젝트의 계획과 관리 및 정책방향 설정에 크게 기여할 것이므로 주 정부는 다음과 같은 노력을 계속 할 계획이다.

- 기후변화에 대한 캘리포니아 주의 취약성을 감소시킬수 있도록 주 정부의 연구기관들은 핵심적인 연구과제를 발굴해야 하며, 연방정부와 파트너십을 구성해야 할뿐 아니라 전국적으로도 타 연구기관과 협력하도록 한다.
- 여러 가지 불확실성을 감안하여 예비계획에 대한 민감도 분석이 필요하며, 위험도를 기반으로 하는 해석이 필요하다. 보다 정확한 정보를 가질 수 있을 때까지 지방정부는 20%정도 더 심한 가뭄을 대상으로 이수목적의 시설물을 설계할 필요가 있다. 홍수의 경우도 위험도 기준분석(risk-based analysis)이 필요하며, 기후변화 시나리오의 올바른 선택을 하도록 한다.
- 주 정부는 수자원 관리와 생태계 유지를 목표로 하는 유역의 적응대책 개발연구를 위한 시범사업을 지원해야 하며, 이들 시범사업에 대한 재정 지원은 DWR의 계획 표준을 만족시키는 IRWM 계획의 채택뿐만 아니라 이해당사자의 광범위한 지원을 받는 지역에 국한하기로 한다.
- 캘리포니아 주의“수자원 계획 보완작업”의 한 부분으로 매 5년마다 DWR은 향후 25년에 걸쳐 예상되는 해수면 상승과 가뭄, 홍수 범람등에 대한 변화 추정치를 제공하도록 한다.

5. 결론

현실로 나타나고 있는 지구온난화로 인한 기후변화가 수자원 부문에 미치게 될 여러 가지 영향은 세계 각국이 적극적으로 미리 대응하지 않으면 안 될 도전임에 틀림이 없다. 본고에서 살펴본 미국 캘리포

니아 주의 기후변화와 관련하여 예상되는 문제점들은 다른 나라의 경우와 대단히 유사하다. 기온상승으로 인한 자연 적설량의 손실등 강수 및 유출 특성의 변화로 인한 가뭄의 심도와 발생빈도의 증가가 예상되며, 집중호우와 허리케인등의 발생횟수와 강수강도의 증가현상 때문에 홍수의 규모와 그로인한 피해도 훨씬 커질것으로 예상되고 있다. 또한, 기온의 상승은 수질과 여러 가지 목적의 물 사용에 나쁜 영향을 미치게 되며 생태계의 보전 측면에서도 바람직하지 못한 결과를 초래할 수 있다. 특히, 해수면 상승은 캘리포니아 주의 델타 지역을 포함하는 저지대의 홍수범람 문제를 일으키는 한편, 수중생태 서식처를 위협하고 해안지역의 지하수를 염수화시키는 등의 수질문제를 발생시킬 것으로 예상되고 있다.

기후변화로 인해 우리 인류가 맞이하게 될 이와같은 도전에 미리 대처하는 길은 기후변화가 수자원 부문에 미치는 각종 영향에 대한 과학적인 평가와 전망 아래 가뭄과 홍수의 발생에 대비하고 수질을 보전하며, 생태계를 유지할수 있도록 하는 종합적인 수자원 관리 실천계획을 수립하여 추진하는 것이라 할 수 있으며, 본고에서 살펴본 미국 캘리포니아 주의 수자원 부문 기후변화 적응전략은 우리나라의 적응전략으로 거의 그대로 받아들일수 있는 내용이라 할 수 있으며, 이를 다시 한번 요약 정리하면 다음과 같다.

첫째로, 대 하천유역별 혹은 권역별로 통합수자원 관리 계획을 수립·추진해야 하며, 사용되는 수단으로는 구조물적 및 비구조물적 수단을 총 망라 하여야 한다.

둘째로, 물 사용 효율을 획기적으로 개선하기 위해 물 절약시책, 용수 재이용률의 제고, 빗물이용, 대국민 물 절약 홍보 등을 강화해 나가야 한다.

셋째로, 홍수피해의 획기적 저감을 위해 통합홍수 관리시스템을 구축·운영하여야 하며, 신규 치수시설의 설치, 기존 시설의 유지관리 및 보강, 비구조물적 대책과 위기관리 차원의 적응대책등을 총 망라하여야 한다.

넷째로, 생태계의 기능을 유지하고 증진시키며 복원 시킬 수 있도록 용수공급 및 홍수관리시스템은 통합수자원관리시스템으로 구축되고 운영되어야 한다.

다섯 번째로, 수자원의 추가적인 확보와 지표수 및 지하수의 연계관리를 강화함으로써 기후변화로 인한 수자원의 양과 질이 가지는 불확실성에 대응할 필요가 있다.

여섯 번째로, 수자원에 관련되는 모니터링과 자료 분석 및 관리방법을 개선함으로써 수자원 계획 및 관리를 개선하는 것은 물론이고 수자원시스템의 실시간 운영 및 최적화를 기할수 있다.

일곱 번째로, 장래의 지역별 해수면 상승정도를 전

망하여 적응대책을 수립함으로써 해안 저지대의 홍수 범람 및 수질오염 피해등에 대비하여야 한다.

여덟 번째로, 기후변화 영향과 적응대책에 관련되는 핵심적인 연구항목을 발굴하고 연구추진을 위한 재원을 확보함으로써 연구 성과의 활용에 의한 편익을 극대화 할 수 있도록 해야 한다.

마지막으로, 위에서 언급된 수자원부문의 여러 가지 기후변화 적응전략의 실무 집행을 위해서는 통합수자원관리 계획의 수립과 사업시행에 필요한 투자재원의 확보가 필수적이므로 장기적인 재원확보 계획의 수립과 재원 확보 및 사업집행 책임기관을 분명히 해 둘 필요가 있다. ☞

참고문헌

기상청/국토해양부, 기후변화와 물, IPCC 기술보고서 VI(번역:윤용남), 2009

윤용남, 통합수자원관리를 위한 수단들과 그의 적용방법(I), - 통합수자원관리의 기본 개념과 접근방법-, 한국수자원학회지 제41권 제11호, 2008

윤용남, 통합수자원관리를 위한 수단들과 그의 적용방법(II), - 통합수자원관리를 위해 사용되는 수단들-, 한국수자원학회지 제41권 제12호, 2008

윤용남, 물 관련 재해 대처를 위한 기후변화 적응대책, - 일본의 적응 대책을 중심으로-, 한국수자원학회지 제42권 제9호, 2009

IPCC, Climate Change 2007 : Synthesis Report, 4th Assessment Report, 2007

IPCC, Climate Change and Water, Technical Paper VI, 2008

Thomson/West, California Water Code, Volume 1&2, Desktop Edition, 2003

State of California, Department of Water Resources, Managing an Uncertain Future: Climate Change Adaptation Strategies for California's Water, <http://www.Climatechange.ca.gov/adaptation/water/index.html>, 2008

State of California, Delta Vision, w.w.w.deltavision.ca.gov

State of California, Bay-Delta Conservation Plan(BDCP), w.w.w.resources.ca.gov/bdcp

State of California, Delta Risk Management Strategy(DRMS), w.w.w.drms.water.ca.gov

State of California, Delta Regional Ecosystem Restoration Implementation Plan (DRERIP), w.w.w.delta.dfg.ca.gov/erpdeltaplan

State of California, California Water Plan Update, Volume 1 & 2, Department of Water Resources, 2003