

## 지구 기후변화에 따른 미래의 물문제

이상호 (부경대학교 토목공학과 조교수)

21세기에는 지구의 물순환에 커다란 변동이 발생하리라고 예상되고 있다. 19세기 이후의 급격한 화석연료 사용으로 대기중의 이산화탄소 농도가 급증하여 왔고 21세기 중에는 현재의 두 배 내외로 증가하리라고 예상되는 가운데 이로 인한 지구 대기온도가 1.5℃~4.5℃로 증가할 것으로 예측되고 있다. 지구 대기의 온도상승은 해양과 대기의 에너지 순환 변동을 야기하여 물순환 양상을 크게 변화시킬 수 있다. 또한 온난화로 인한 해수면 상승도 크게 우려되고 있다. 수문순환 변동은 곧 강수량, 증발량, 토양함수량 등이 달라지는 것을 의미하므로 21세기의 국가수자원 관리는 현재의 방식에 대폭적인 변화를 요구할 수도 있다. 본 글에서는 이러한 국가적, 세계적 변화에 대비하여 미래의 수자원 상황을 고찰하고 향후의 과제를 제시하고자 한다.

### 1. 지구의 기후 현황

#### 1.1 지구의 이해

지구의 외부층(outer layers)은 氣圈, 生物圈, 水圈, 岩石圈으로 분류된다. 이들은 生態圈이라는 용어로써 통합될 수 있다. 지구 외부층에서 일어나는 일을 연구하는 데는 위의 여러 권역을 하나의 체계속에서 조망하고 서로의 의존 관계를 규명하는 방식이 사용되어야 한다. 식물의 예를 들어보자. 이는 토양에 뿌리를 박고 몸체를 지탱하고 살아간다. 즉 암석권에 자신의 몸을 고정시키고 있다. 그리고 생장의 필수요소로서, 암석의 풍화에 의하여 형성된 광물질이나 영양소를 흙 속에서 흡수한다. 동시에 식물은 대기로부터

CO<sub>2</sub>를 얻어서 탄수화물을 만들고 이로부터 자신의 세포를 형성한다. 또한 수권의 일부분인 물을 흙에서 섭취한다. 식물은 생물권의 한 요소이자 생태권을 구성하는 네 권역 내에 존재한다. 만일 생존기간 중에 네 가지 권역 중에서 하나라도 심각하게 변화된다면 — 예를 들어 흙 속의 물이 말라버린다면 — 시들거나 죽게 될 것이다. 우리는, 위와 같이 극단적인 예를 통해서, 한 가지의 유해한 상황으로 말미암아 다른 요소에 악영향을 끼치는 도미노 현상을 이해하게 된다. 과학자들은 지구가 미세한 평형속에 있다고 말하고 있다. 만일 자연계의 입력요소에 변동이 생겨서 '자연의 평형'이 깨진다면 그 결과는 우리의 건강한 삶에 유해하게 될 것이다.

자연계 혹은 네 가지의 권역에서 진행되는 과정은 일정한 수준의 입력이 주어져야 다른 상태나 수준으로 변화하게 된다. 이렇게 어느 수준을 넘는 입력 수준을 이른바 '문지방(thresholds)' 이라고 말한다. 1985년에 남극 상공의 성층권 오존층에 구멍이 뚫린 것을 발견한 것은 자연계의 특정한 현상이 문지방을 넘어버린 중대한 사건이었다. 즉 남극의 성층권을 덮고 있던 오존의 양이 감소하여, 여러 조건들로 구성된 일정 한계를 넘어서서 오존층 구멍이 뚫리게 된 것이다. 여기서 생각해 보아야 할 것은, 인간 활동으로 야기된 결과물들이 대기와 해양의 복합체계가 이루고 있는 동적인 평형상태의 문지방을 넘어서고 있지 않은가 하는 점이다.

#### 1.2 온난화와 해수면 상승

지구 기후변화를 일으키는 자연적인 요인은 板構造

의 이동에 동반된 화산활동, Milankovich의 지구궤도의 변화, 대규모 流星의 충돌 등이 있다. Milankovich에 의해 주장된 지구궤도 변화는 빙하기의 도래를 설명하는 주요 이론이다. 과학계에서는 현재를 간빙기의 마지막 단계로 이해하여 19세기의 小氷河期 이후에 기온이 하강할 것이라고 예상하였으나 최근의 자료는 기온이 오히려 상승하고 있는 것으로 나타난다. 최근의 기후변화 원인은 성층권의 오존 고갈과 대기의 온난화로 지목되고 있다.

최근 몇 년간 여러 매체를 통하여 들을 수 있는 '온실효과(greenhouse effect)'는 1896년에 스위스 화학자 Arrhenius와 미국의 지질학자 Chamberlain에 의하여 독립적으로 처음 관측되었다. 당시 Arrhenius는 자연의 대기에 CO<sub>2</sub>가 2배 되면 기온이 5~6℃ 상승할 것이라고 제시하였다.

온난화를 유발시키는 주범은 수증기, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 대기권 내의 오존(O<sub>3</sub>), 질소 산화물, 암모니아, CFCs(chlorofluorocarbons), halon 등의 기체이다. 이 중에서도 이산화탄소가 주된 요인으로 지목되고 있다. 온실기체의 증가는 산업혁명 이후에 화석연료를 급격하게 사용하였기 때문으로 분석되고 있다.

온난화에 대한 반론은 100년 정도의 기온관측이 갖는 적합성에 대한 것이다. 매일 전 지구를 통해서 60,000 회 이상의 기온관측이 이루어지지만 대부분의 관측소가 북반구의 인구 조밀 지역에 위치하고 있다. 그리고 해양자료는 이 기록에 거의 포함되어 있지 않다. 더구나 지상 기온관측소의 대부분은 도시지역에 위치하므로 상대적으로 높은 수치를 가리킬 수밖에 없다. 비평가들은, 기후변화 모형으로 온난화 모의(simulation)를 할 때 위와 같은 열섬 효과가 경시되고 있음을 지적한다.

이렇게 의견이 대립됨에도 불구하고 1988년에 결성된 International Panel on Climate Change (IPCC)는 온난효과의 미래 영향을 예측하여, CO<sub>2</sub>가 2배로 증가하면 지구의 표면온도가 1.5~4.5℃ 상승할 것이라고 1990년에 발표하였다. 온난화의 주요 결과로서 미래의 해수면 상승문제가 제기되어 왔다.

1990년에 IPCC는 2100년까지의 해수면 상승을 예측하여 제시하였다. 즉 매년 0.6 cm의 해수면 상승에 의하여 2100년에는 1990년 보다 약 66 cm가 상승할 것으로 예상하고 있다.

### 1.3 기후변화에 대한 예측

지구의 환경변화, 특히, 기후변화를 인지하면서 제기된 것은 과연 이러한 문제가 앞으로 인류의 생존과 발전에 위협요소가 될 것인가 하는 점이다. 이러한 의문을 현재의 상황과 연관지어 본다면 이미 우려의 수준을 넘어서 즉각적인 대책이 필요한 일들이 벌어지고 있다. 쉬운 예로서, 남극상공에 넓게 형성된 오존 구멍이 미치는 영향을 찾아볼 수 있다. 남극에 인접한 칠레 남부지역의 어린이들은 야외에서 놀 때 자외선의 피해를 막기 위해서 색안경을 쓰고 있다. 보다 심각한 예로서 사하라 사막 주변 국가에서 벌어져온 사막화 현상을 들 수 있다.

위와 같은 예를 보더라도 지구의 기후변화는 과학 영역에서 벌어지는 부분한 의견 개선의 차원을 넘어서 인류의 생존과 직접 관련되어 있음을 알 수 있다. 사막화, 오존층 파괴, 온난화 등의 지구 기후 문제를 해소하려는 노력은, 기후변화가 가져올 미래의 환경을 예측하려는 시도로 이어졌다. 그리고 이러한 예측에는 과학적이고, 객관적이며, 정량적인 접근방식이 요구되고 있다.

미래의 기후변화를 예측하는 데 중요한 수단으로 사용되는 것은 대기대순환 모형(general circulation model)으로 명명된 대기의 수치모의 모형이다. 이는 2차 세계대전 이후로 매일 매일의 풍향, 풍속을 예측하는데 도움을 주는 대기 역학적 도구로서 사용되다가 발전되어, 대기 순환과 물 순환의 연결관계를 규명하는 수학적 수단이 되었다. 예로서, 아마존 유역의 산림 축소나 아프리카에 몰아닥치는 가뭄 현상이 기후에 주는 영향을 평가할 수 있다. 그렇지만 대기대순환 모형으로는 아직까지 몇 년간에 걸친 온도, 강수, 증발 등의 평균값을 제시할 수 있을 뿐, 이들 평균값을 국지적인 값으로 분해하여 관측값을 재현하는 데는 능력이 미치지 못하고 있다.

대기대순환 모형은 수문학자들에게 “수문순환과 물수지”라는 수문학의 기본과제를 새로운 방식으로 접근할 수 있는 기회를 제공하였다. 게다가 대기의 광역적인 물수지를 대기대순환 모형으로부터 분석하면, 그 영향이 지역기후에 미치는 과정을 이해할 수 있으며, 지표면과 대기 사이의 교환작용(feedbacks)이 기후를 유지하는데 어떻게 작용하고 그 민감성은 어떠한가 등을 분석할 수 있다. 현재 IPCC를 중심으로 한 기후변화 시나리오의 근거는 선진국의 대기대순환 모형 모의결과를 바탕으로 하고 있다.

## 2. 수문순환 및 수자원에 미치는 기후변화 영향

### 2.1 강수량

기후는 자연적인 원인에서건 인간활동에 의해서건 간에 계속 변화하고 있다. 만일 산업혁명 이후의 화석 연료 사용이 지구의 온난화에 영향을 미쳐왔다면 최근까지의 기상 변수 관측자료를 조사함으로써 미래에 대한 암시를 얻어낼 수 있다. 즉 계속되는 변화상황에서 최근까지의 과거 자료를 분석하는 것이 미래를 여는 단서가 될 수 있는 것이다.

#### 2.1.1 기후와 강수량 변동의 관계 평가사례

Masukura와 Yoshitani(1992)는 일본의 100년 간 기상 관측자료를 바탕으로 온난기와 한랭기의 강수량 변화를 분석하였다. 먼저 1889~1989년의 기상 자료를 분석하여 10년의 따뜻한 시기와 10년의 선선한 시기를 채택하였다. 한랭기는 1901~1911년의 기간이고 온난기는 1956~1965년의 기간이다.

먼저 단기강수에 대한 분석 결과는, 1일 강수량이 50 mm를 초과하는 빈도가 온난기에 높게 나타났다. 또한 2일, 3일간의 강수량이 150 mm를 넘는 빈도도 온난기에 보다 높았다. 연 강수량은 온난기가 큰 것으로 나타났다. 일단 이런 분석자료를 토대로 알 수 있는 것은, 일본에서는 온난시기에 호우의 강수량과 연 강수량이 컸었다는 점이다.

#### 2.1.2 우리나라의 강수량 변동-기후 관계 분석사례

전술한 일본의 기후 - 강수량 변동 분석과 유사한 연구를 우리 나라에서도 최근 수행하였다(김영준 등 1997). 여기서는 우리 나라에서 기상관측을 시작한 1904년부터 1925년까지를 한랭기로 설정하였고 1936~1963년의 28년간을 온난기로 설정하였다.

5개의 기상 관측소에 대하여 한랭기간과 온난기간의 평균 기온 및 평균 강수량을 구한 결과 온난기에는 강수량이 3, 6, 9월에 두드러지게 많았으나, 7, 8월은 오히려 한랭기에 강수량이 많았다. 연 평균값은 온난기가 한랭기보다 55.8 mm 더 많았다. 특히 북포의 경우는 연 강수량의 차이가 111.7 mm에 달하여 매우 크다.

#### 2.1.3 미래의 강수량 평가

최근까지 사용되어온 10여 종류의 대기해양접합 대기대순환 모형 모두 미래에 이산화탄소가 증가함에 따라 강수량이 증가하는 모의결과를 산출하고 있다. 영국 기상연구소의 대기대순환 모형 수행결과(Kattenberg 등, 1996)를 보면, 겨울철에는 고위도 지역에서 강수량이 증가하고 중위도 지역까지 확장되어 있다. 여름철의 열대지방은 아시아 남동지역에서 강수량 증가가 더 크고 남부유럽은 대체로 감소하는 결과를 보인다. 우리 나라 지역은 여름 3개월 동안 하루 평균 1~2 mm의 강수량 증가가 예상되고 있다. 이를 3개월 총량으로 보면 90~180 mm의 강수량 증가이다. 현재의 연평균 강수량을 1274 mm로 볼 때 여름철에만도 약 7~14%의 강수량 증가가 예상되고 있다.

### 2.2 유출의 계절적, 지역적 변동

지표면 유출량의 변화는 온도변화에 의해 나타날 수 있다. 어떤 지역에서는 평균 강수량이 거의 변화하지 않는다고 하여도 지표면 유출의 시기적인 분포가 바뀔 수 있음이 예측되고 있다. 예로서 GFDL 일반순환 모형으로써 모의한 California 유역의 월평균 유출량 분포와, 관측된 과거 기록 월평균 유출량을 비교한

결과 대기대순환 모형의 결과가 겨울철 유출이 크게 증가하고 여름철 유출이 감소함을 나타내고 있다 (Gleick, 1987). 후속 결과로서 유추할 수 있는 것은, 유출이 집중된 달에 더 많은 유출이 일어남으로써 홍수의 빈도가 증가할 수 있다는 점이다.

유출의 지역적인 변화도 미래의 수문량 변동에서 충분히 예견되는 상황이다. 굳이 미래에 대한 예측을 수행하지 않더라도 과거의 자료를 바탕으로 살펴볼 수 있다. Binnie와 Herrington(1992)은 영국의 1961-1988(28년간) 동안의 평균 유출량에 대한 1989년과 1990년의 유출량의 비율을 지역적으로 표시한 결과 매우 큰 변화가 있음을 제시하였다. Wales와 서부 Scotland 지방은 더욱 습윤상태를 나타냈으며 다른 지역은 건조하였다. 특히 동부 해안지역은 가장 심한 건조 상태를 보였다.

영국의 유출분포 변화는 우리 나라를 생각할 때 의미있는 일이 분명하다. 즉 국토면적이 협소한 나라일 지라도 지구규모의 광역적인 기후변화가 지역적 강수 및 유출 분포를 크게 바꿀 수 있으리라는 점이다.

### 2.3 기후 변화가 수자원 체계에 미치는 영향 연구

Mimikou 등(1993)은 미래 기후의 예측 상황을 반영하여 기후 변화 시나리오를 작성하고 연속 유출모형에 의하여 유역의 유출량 변동을 모의하고 평가하였다. 또한 그 결과가 수력발전소의 운영에 미칠 영향을 평가하였다.

먼저 온실 기체의 배증에 따른 온도변화 시나리오는 1℃, 2℃, 4℃로 설정하고 강수량의 변화는 ±20%, ±10%, 0%로 설정하였다. 연구 대상지역은 그리스의 중앙 산악지역으로서, 유역면적이 134.5~1173 km<sup>2</sup>에 이르는 4개 유역이다.

연구결과를 보면 일반적으로 가문 해의 유출 감소가 훨씬 두드러지게 나타났다. 그것은 증발산량이 유출에 비례하여 발생하지 않기 때문이다. 유출의 계절 변화도 살펴볼 수 있는데, 눈의 피복이 두꺼운 지역은 (Mesohora 유역) 강수량 변동이 없이 온도가 상승하면 겨울철 유출량이 늘어나고 여름철 유출이 감소하

였다. 반면 온난한 유역은(Pyli 유역) 겨울철 적설이 거의 없어서 유출량의 계절적 변동이 그리 달라지지 않았다.

이러한 유출량이 수자원에 미치는 영향은 전력 생산량이나 물 공급량이 목표값을 달성하지 못하는 비율을 통계적으로 계산함으로써 평가되었다. 분석 결과는 저수지 운영의 목표 미달상황이 온도 변화보다 유출량 변화에 주로 지배된다는 점이다. 만일 강수량이 줄게되면 온도 증가에 무관하게 운영 목표 미달 상황이 매우 크게 증가함을 볼 수 있는 반면 강수량이 증가하면 온도가 증가하더라도 목표 미달 상황을 증가시키지 않는다.

## 3. 엘니뇨 현상과 기상변화

미래의 기후변화는 주로 화석연료 소비와 이산화탄소 농도 증가에 주로 초점이 맞추어져 있다. 그렇지만 현재까지 지속되어 왔고 앞으로도 계속되리라고 믿어지는 엘니뇨(El Niño) 현상에 의한 약 5년 이하 주기의 단기 이상기상은 전세계적으로 커다란 영향을 미치고 있으므로 이에 대해서도 간략히 다루고자 한다.

### 3.1 엘니뇨 현상의 유래

대기와 해양은 서로 에너지를 교환함으로써 서로 영향을 끼친다. 해양은 대기에 막대한 숨은 열(latent heat)을 공급하여 대기순환을 돕고 대기는 바람의 변형력을 통하여 해류를 일으킨다. 엘니뇨 현상은 적도 부근 태평양상의 온난 해류가 비정상적으로 강해져서 태평양 전체 해역에 걸쳐 기상변동을 야기하는 것을 말한다. 엘니뇨 현상의 원인은 아직 명확히 밝혀지지 않은 상태이다. 이 현상은 1950~1965사이에 약 5년을 주기로 나타났으며 1965년 이후로는 약 4년으로 주기가 빨라졌다. 우리 나라는 엘니뇨 현상의 영향에 간접적으로 관련되어 있지만 오세아니아주와 아메리카주의 적도 주변국, 아프리카 남동부, 인도 등의 광범위한 지역에 사회경제적으로 큰 영향을 미치므로 관심을 가져야 할 문제다.

남아메리카의 페루 및 에콰도르의 동부 열대 태평

양 연안 해역에서는 적도에서 약간 북반구에 치우쳐 있는 열대수렴대를 향해 해안과 평행하게 남동 무역풍이 불고 있다. 이 남동 무역풍은 중위도의 찬 해수를 연안류(페루 해류)로 운반할 뿐만 아니라, 코리올리 힘의 영향으로 표층의 해수를 외해 쪽으로 이동시킨다. 따라서, 표층수가 이동한 자리를 메우기 위해 심층으로부터 찬 해수가 올라오게 되며, 이로 인하여 이 해역의 해면 수온은 낮다. 하층으로부터 상승한 해수는 영양염류를 다량 함유하고 있으며, 이로 인하여 플랑크톤이 풍부하다. 따라서, 해양 생태계의 먹이사슬 결과 동부 열대 태평양의 이 연안해역은 '안초비'라는 정어리 어장으로 유명하다.

크리스마스 때부터 남반구는 여름이 되어 이듬해 3월경까지 열대수렴대는 적도 부근으로 남하한다. 따라서 페루와 에콰도르 부근의 남동 무역풍이 약해지기 때문에 연안 용승 자체가 약해질 뿐만 아니라, 적도 부근의 따뜻한 해수가 밀려온다. 북쪽으로부터 난류가 내려올 때 난류계의 어류가 풍부하므로, 어민들은 이것을 크리스마스 선물로 생각하여 감사의 뜻으로 엘니뇨(신의 아들) 해류라고 부르게 되었다.

그런데 수년에 한 번 정도 간격으로 이 엘니뇨 해류가 비정상적으로 강해져, 수 °C나 높은 수온이 1년 중 계속되는 때가 있다. 이런 경우에는 용승에 의해 유지된 풍부한 해양생태계가 파괴되어, 페루 부근의 정어리 어장은 괴멸적인 타격을 입는다. 더욱이 높은 수온은 페루 북부에 많은 비를 내리게 하여 홍수 등의 재해를 초래한다.

이러한 이례적인 해양현상은 페루 연안에 한정되지 않고 태평양의 넓은 해역에서도 나타난다는 사실이 최근의 연구에 의해 명확해졌다. 더구나 그 영향은 해양뿐만 아니라, 기상학적, 생태학적, 경제적으로 전 지구적인 폭을 가지고 있음을 알게 되었다. 따라서 초기에는 페루 연안에서 크리스마스 때부터 이듬해 3월경까지 나타나는 계절적인 현상을 가리키던 '엘니뇨'라는 말이, 최근에는 수년에 한 번씩 동부 태평양 적도 해역에서 대규모로 나타나는 고온 현상을 나타내게 되었으며, 이를 '엘니뇨 현상'이라고 한다.

엘니뇨 현상은 기상의 이상 변동을 초래하는데 그

로부터 어업 등 경제적인 면으로 영향이 파급된다. 엘니뇨 현상이 우리나라, 유럽 등 중위도 이북 지역에 얼마나 영향을 끼치는지는 아직 명확하게 알려져 있지 않다. 그러나 다음과 같은 기상 특징이 동북아 지역에 나타나고 있다.

- (가) 장마 기간 기온이 평년보다 낮고, 강수량이 많다.
- (나) 겨울의 기온이 평년보다 높고, 강수량이 많다.
- (다) 태풍의 발생 수가 평년보다 적다.

#### 4. 농업에 미치는 기후변화 영향

농작물의 생장기간에는 일정 한도 이상의 기온이 지속되어야 한다. 온도가 증가하면 작물의 생장을 충족시키는 기간이 길어지므로 작물재배의 한계선이 극 방향으로 확장되게 된다. 대체로 1°C의 연평균 기온이 상승되면 북반구의 중위도 지역에서는 150~200 km의 곡물재배 한계선이 확장될 것으로 보이고 농경에 적합한 고도는 약 150~200 m 상승할 것이다.

기온의 상승은 겨울철 한랭효과에도 영향을 준다. 대부분의 작물은 開化 시작이나 개화 과정 촉진을 위하여 겨울철에 일정기간 동안 낮은 온도 속에 있어야 한다. 이 기간을 휴면타파기라고 한다. 그런데 겨울철 기온이 상승하면 꽃봉오리가 피어나는 시기가 늦어지므로 작물 생산량이 줄어들게 된다. 1°C의 기온상승으로 말미암아 겨울철 한랭 조건은 10~30% 감소되는 것으로 추정된다. 이는 온대 기후에 적합한 작물의 재배 지역을 극 방향으로 이동시키는 효과를 낼 것이다.

이병렬(1994)은 이러한 21세기의 기온 상승 예측 값을 반영하여 2°C, 4°C 상승시의 우리나라 농업기후 지대와 작물재배기간 변동을 연구하였다. 불과 1세기 내에 대기의 평균 기온이 1.5~4.5°C 상승하는 것은 매우 급격한 환경 변화이다. 이에 따른 농업생태계의 변화를 예상하려면 에너지 수지 전반에 대한 이해와 강수량, 토양수분량 등에 대한 포괄적인 이해가 동반되어야 하지만 이병렬의 연구는 온도조건만을 고려하여 결과를 도출하였다.

#### 4.1 식물기간 변동

식물기간이란 일 평균기온이 5℃ 이상인 연중일수를 말한다. 봄에 일 평균기온이 5℃ 이상 되면 월동작물이 다시 생육을 시작하고 가을철에 5℃ 이하로 기온이 낮아지면 낙엽이 저서 겨울잠에 들어가므로 과수와 같은 영년생 작물의 재배에 중요한 지표이다. 현재 우리나라에 식물기간은 210~280 일로 분포하는데, 기온이 2℃ 상승하면 220~320 일에 이르게 된다. 만일 기온이 4℃ 상승하면 230~340 일로 늘어나서 남부 해안지대와 동해 남부지역은 겨울이 없는 아열대성 기후를 갖게 될 것이고, 중부지방은 현재의 남해안 도서지역과 유사한 기후를 갖게 될 것이다. 따라서 현재 중부 이남지역에서만 재배할 수 있는 월동작물인 밀, 보리 등의 재배가능 지역이 북상할 것으로 예상된다.

#### 4.2 벼 재배지대와 재배기간의 변동

유효온도 15℃ 이상의 평균 작물생육기간으로 볼 때 대평릉 등 태백고냉지대는 벼 재배가능기간이 불과 100일 내외 밖에 안 되어 경제적인 벼 재배가 불가능하다. 그런데 일 평균온도가 2℃ 상승할 경우 태백고냉지대, 소백산간지대, 노령산간지대, 일부를 제외한 남한 전지역에서 중만생종 또는 만생종의 벼 재배가 가능하게 될 것이다. 남부 해안지대와 남서 해안지대는 작물 생육기간이 190~200 일에 이르러 현재보다 다양한 양식의 다모작체계 도입이 가능할 것으로 보인다.

기온이 4℃ 상승하게 되면 벼의 재배가능기간은 남해안지역의 경우 210~220 일에 이르는 아열대성 기후가 된다. 이러한 조건에서는 현재 선호되고 있는 일반적인 품종과 재배기술로 양질의 벼를 생산하는데 큰 장애가 생길 것이다. 먼저 미래의 기후조건에서 지역적인 강수량 분포가 변하여 분담이양에 충분한 용수가 공급되지 못하거나 관개시설이 미비할 경우 원하는 시기에 벼를 재배하기 어려울 것이다. 둘째로 여름철 고온기간이 길어져서 작물생육에 고온장애를 유발할 것이다. 그러므로 고온적응력이 높은 신품종 선

발이나 육종이 없으면 온난화로 인한 기후자원의 증대효과가 거꾸로 농업생산성과 안정성을 저해하는 방향으로 작용할 가능성이 크다.

#### 4.3 사과 재배지대 변동

사과의 재배는 따뜻한 생육기간과 추운 월동기간이 반복되어야 하는 까다로운 생육환경이 필요하다. 월동작물인 과수는 일 평균기온이 10℃ 이상 되면 생육을 활발히 재개하면서 발아, 개화 등이 진행되므로 온대 과수재배에서는 이 시기를 매우 중시한다. 그러나 온대과수가 봄에 개화하려면 월동기간 중에 추위에 일정기간 이상 노출되어야 한다. 사과의 경우에는 7℃ 이하의 온도에서 약 60일 이상 노출되어야 이듬해 봄에 개화한다.

만일 기온이 2℃ 상승하면 남한 전 지역에서 비교적 안정된 생육일수를 확보할 수 있을 것이다. 그렇지만 생육가능일수가 증가될 경우 사과의 생육전반이 앞당겨지게 되어 개화기의 늦서리 또는 저온피해가 현재보다 증가될 가능성이 있다. 또한 개화 이후 착과, 결실, 성숙기간이 고온하에 있게 되므로 일소현상 등의 물리적 고온장애를 받아 품질이 저하되게 된다. 결국 사과재배지대는 북쪽으로 이동하게 되고 새로운 추산단지가 형성될 가능성이 높다.

### 5. 해수면 상승과 연안방재

#### 5.1 해수면 상승의 예상

조위기록을 분석한 결과 지난 100년간 지구의 해수면은 약 10~25 cm 상승하였음이 밝혀졌다. 지구의 기온상승은 위와 같은 해수면 상승에 큰 원인으로 지적되고 있다. 100년 동안 기온의 상승과 그에 상응한 해수의 팽창은 2~7 cm의 해수면 상승에 기여한 것으로 분석되고 있다. 빙하와 만년설이 녹아서 후퇴한 것은 해수면을 2~5 cm 상승시킨 것으로 추정된다.

21세기 100년간은 지구 기후변화로 인하여 지역에 따라서 약 1 m 까지도 해수면이 상승할 것으로 IPCC가 1990년에 예상하였다. 이렇게 되면 수십만 km<sup>2</sup>의 연안지역과 저지대가 해수로 뒤덮일 것이고 해변은

몇 백 m나 후퇴할 것으로 보인다. 해수범람에 직면한 지역에서는 건물, 농경지, 인명, 가축, 기반 시설 모두가 위협받게 된다.

방조제 등으로 해수면 상승에 대비한다고 할 때, Delft 수리연구소에 의하면 21세기 100년간 1 m의 해수면 상승이 발생하면 약 360,000 km의 해안방어 공사가 필요할 것이고 소요비용은 5천억 불에 이를 것으로 추산하고 있다.

## 5.2 해수면 상승과 우리 나라의 문제

해수면 상승은 우리 나라의 연안 방재에도 큰 영향을 줄 것이다. 이러한 전망이 기우가 아니라는 것은 1997년 8월의 서해안 해수범람을 보면 알 수 있다. 全南지역에서는 1997년 8월 19일 새벽부터 21일 사이에 巨市 사리와 태풍 위니의 영향으로 파고가 높아져 해수가 범람하였다. 이로 인하여 90억3천8백 만원의 재산피해를 냈다.

국립해양조사원은 당초 이번 백중사리로 목포의 수면이 5 m 3 cm까지 올라갈 것으로 예상했다. 평상시 수위는 4 m 26~ 4 m 35 cm, 보통 사리 때는 4 m 80~4 m 95cm이므로 평년 백중사리 수위 정도면 큰 피해는 없을 것으로 내다봤다. 1996년 백중사리 때도 수면은 19일 예상값 보다 높은 5 m 12 cm였는데도 큰 피해는 없었기 때문이다. 그러나 19일 오전3시27분 사리 때는 목포의 해수면이 예상보다 35~40 cm 더 올라가는 등 서해안 수면이 크게 상승했다. 기상청이나 목포시, 조석간만의 차를 분석, 예보하는 해양수산부도 백중사리와 태풍영향이 겹칠 것이라는 사실을 예상치 못해 피해가 더욱 컸다. 이를 보면 현재대로의 이산화탄소 방출로 닥칠 21세기말의 66 cm 내외의 해수면 상승은 해안지역에 위협요소로 작용할 것이 분명하다.

## 6. 미래 환경에 대한 대비

### 6.1 기후 변화와 설계홍수량

온난화로 예상되는 강수량의 증가는 공학적인 측면에서 설계홍수량과 관련된다. 댐이 붕괴하면 하류지

역에 막대한 피해를 초래할 경우, 댐의 수문학적 설계에는 가능 최대홍수량을 고려하는데 가능 최대홍수량은 가능 최대강수량으로부터 유도된다. 가능 최대강수량은 대기 중의 수분량과 직접적인 관련이 있다. 온난화와 대기 중 수분량의 관계를 분석하면 가능 최대강수량의 증감도 예상할 수 있으므로 극단적인 사상에 대한 설계홍수량의 변화 양상도 예견될 수 있다. 대기 중 수분은 대부분 바다로부터 공급되므로 바다 표면의 온도가 조금만 변화되더라도 수분량에 큰 영향을 미친다. 온도가 1℃ 증가하면 바다 위의 포화 증기압은 약 10% 증가한다.

만일 앞으로 몇 세기 동안 1~2℃ 상승한다고 하여도 가능 최대강수량 값이 10% 이상 증가되는 것은 충분히 예상되는 일이며 이는 미국내에서 25,000 km<sup>2</sup> 면적의 24시간 지속 가능 최대강수량으로 볼 때 40~50 mm에 해당하는 양이다. 따라서 극단적인 홍수사상에 대비하기 위한 대규모 수공구조물의 설계기준은 대폭적인 상향이 불가피하다고 생각된다.

### 6.2 영국 물 관리회사의 기후변화 시대 수자원 계획

#### 6.2.1 기후변화 문제에 관한 1980년대의 영국의 대처

영국에서는 1989년부터 심한 가뭄이 지속되어 지하수가 고갈되기에 이르렀다. 가뭄이 1990년으로 지속되자 영국의 남부 수자원 서비스회사(Southern Water Service)는 남부 과학회사(Southern Science Ltd)에 의뢰하여 다음과 같은 기후변화 관련 연구를 수행하도록 하였다(Hewett 등, 1993).

- (가) 온실효과 확대에 의한 기후변화와 남부 수자원 서비스회사의 업무에 끼치는 영향
- (나) 해수면 상승과 남부 수자원 서비스회사와의 관련성
- (다) 남동 England 지방 Chalk 지하수 대수층의 재충전 유형

이러한 행동은 IPCC의 최초 보고서 작성시기인 1990년도나 영국내의 기후변화 검토 위원회(United Kingdom Climate Change Impacts Review

Group)의 최초 보고서 작성보다도 선행된 것이었다. 가뭄이 지속되는 동안 1990년 7월까지 남부 수자원 서비스회사의 Kent 및 Sussex 지부에서는 수요 제한 조치를 취하고 있었으며 물 관리 담당자들은 의문을 제기하기에 이르렀다. 즉 가뭄의 발생이 기후변화의 영향으로 일어났는지 의혹을 가졌으며, 기후변화 상황에서 이러한 가뭄현상이 훨씬 자주 발생할 것인지, 그리고 기후 변화가 일어나면 과연 사람들이 그에 대처할 수 있는지 등의 의문을 제기하였다. 특히 영국의 남부 지역은 제한된 수자원으로 인하여 기후변화와 관련된 문제에서는 주요 관심지역이 되어왔다.

기후변화와 관련된 사업여건에 대하여 남부 수자원 서비스회사는 영국 국립 하천청과는 대조적으로 분명한 입장을 가지고 있었다. 즉 보다 명확한 증거가 확보될 때까지 대책 없이 기다려서는 안된다는 것이었다. 방관하는 자세는, 대중들에게 물관리 서비스를 제공하는 책무를 가진 회사가 취해야 할 태도가 아니라고 믿고 있었다. 따라서 이 회사는 기후변화를 작용하고 있는 가설로서 받아들여서 회사의 사업계획에 반영하게 되었다.

### 6.2.2 영국 남부 수자원 서비스회사의 자원관리 전략 전개

기후의 변동 시나리오 아래서 물 공급의 신뢰도는 점점 불확실해지고 있는 가운데, 남부 수자원 서비스회사는 새로운 상황에 대처하기 위하여 다음과 같이 단계적인 수순을 밟아 나갔다.

제 1단계: (1989). 1989년에는 남부 과학회사로 하여금 남부지역의 수자원 현황을 조사하고, 순차적인 수자원 개발 계획안을 제시하도록 하였다.

제 2단계: (1990). 1989년부터 지속된 가뭄으로 말미암아 기후변화의 영향을 전망하는 연구가 촉진되었다.

제 3단계: (1991). 물 사용자에 대한 서비스 지표를 계산하고 관계를 분석하는 방안이 남부 과학회사에 의해 제시되었으며, 이로써 수자원 전망을 갱신하고 확장하는 길을 열게 되었다. 또한, 남부 과학회사는 여러 빈도별로 수자원 수요와 공급 수준을 평가하

는 방법을 개발하였다. 여기에 적용된 재현기간은 10, 20, 50, 100년이다. 개발된 모형은 관련자료를 저장, 갱신, 조작하는 기능이 있으며, 수요량과 공급량을 갱신하고 확장시키는 기능도 가지고 있다.

제 4단계: (1992). 남부 수자원 서비스회사는 수자원 관리계획의 네 번째 단계로서, 기후 변화로 인하여 자원이용이 제약받는 영향을 평가할 모형을 개발하도록 남부 과학회사에 요청하였다.

이러한 4단계 작업에서 기후변화의 영향을 고려하는 업무는 2, 3, 4단계에 명확히 반영되었다. 여기서, 물 관리 계획에 기후변화의 영향을 반영하려는 초기 목표는, 기후변화가 수요와 공급에 미치는 전체적인 영향을 파악할 수 있는 실용수단을 개발하는 것에 두었다. 다시 말해서 기후변화 상황에 따라 특정한 수요 요소 또는 자원 요소에 발생될 세부 시나리오를 작성하는 연구보다는, 전체적인 영향을 관리할 수단 개발에 노력이 기울어졌다. 이렇게 민감성 연구가 시나리오 연구보다 선행된 것은 두 가지 이유에 기인한다. 우선 상황변화의 여러 가지 조합에 대하여 각각의 결과를 판단할 수 있는 능력을 갖추으로써 기후변화 영향에 대한 취약성을 정의할 수 있고 그에 따라 대처하는데 도움을 주기 때문이다. 또한, 기후변화 시나리오와 제반 지표의 변동에 불확실성이 엄존하는 상황에서, 앞으로 일어날 변화의 지표를 세세하게 추정하는데 노력을 기울이기보다는 변화가 야기할 결과를 계량할 수 있는 체계를 구성하는 것이 보다 합당하기 때문이다.

## 7. 기후변화의 한국에 대한 영향과 향후과제

산업혁명 이후의 인간활동이 지구 기후변화를 야기하는지에 대해서는 긍정과 부정의 주장들이 대두되어왔다. 21세기의 도래를 목전에 둔 현 시점에서는 기후변화의 진행을 우려와 함께 인정하는 전망이 보다 설득력을 얻어가고 있다. 이러한 방향으로의 연구결과를 뒷받침하는 국제적 활동은 IPCC를 중심으로 진행되어 왔다. 마지막으로 21세기에 예상되는 기후변화를 우리 나라를 중심으로 재정리하고 앞으로 필요한



과제들을 제시하고자 한다.

미래의 기후는 해양대기접합 대기대순환 모형에 의하여 예측되고 있다. 대부분의 모형에서는 비록 한 두 개의 격자로 우리 나라 전체를 포함하는 과대한 격자망으로 모의하고 있다고 하여도 미래의 강수량이 증가할 것임을 예측하고 있다. 여름철 3개월만 하더라도 90~180 mm 내외의 총강수량이 증가할 것임을 보이고 있다. 어느 기간의 강수량이 증가하는 것은 곧 빈도분석에 의한 특정 재현기간 사상의 크기가 커지는 결과를 초래하게 된다.

특히 기온이 1℃ 상승하게 되면 해수면상의 포화증기압이 10% 상승되므로 가능최대강수량은 매우 커질 것으로 예상된다. 가능 최대강수량은 대규모 수공구조물의 수문학적 설계에 사용된다. 그리고 댐의 수명은 보통 50년 이상이므로 앞으로 계획하여 축조할 댐은 21세기의 기후변화에 직면하게 된다. 따라서 여수로, 홍수조절용량 등 홍수시 운영과 관련된 수문학적 설계 지침은 기후 변화의 영향을 감안해야 할 것이다.

강수량 분포의 지역적 변화도 예상된다. '90년 이전의 30년간 평균 강수량과 '89, 90년의 강수량을 비교한 영국의 예를 보더라도 좁은 국토에서 강수량의 지역적 분포가 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다. 대기대순환 모형의 격자가 매우 크다는 것은 기후변화의 지역적 양상을 분석하기에 장애로 지적되고 있다. 그렇지만 몇몇 선진국은 이 단점을 개선하려고 노력하여 어느 정도의 성과가 도출되고 있다. 다시 영국의 예를 보면 Hadley 센터 기후모의 모형이 가진 격자 크기  $2.5 \times 3.75^\circ$ 가 너무 과대하여 보간법에 의하여  $0.5 \times 0.5^\circ$ 의 격자 위에 모의 결과를 재구성시켰다. 강수량 분포의 지역적 변동에 대해서는 우리 나라의 두 가지 대기대순환 모의 연구사례가 명확한 전망을 제시하지 못할 뿐만 아니라, 오성남(1997)의 연구와 오재호의 연구(1994) 및 그를 바탕으로 수자원 영향을 분석한 김승과 김현준의 연구(1994)가 모두 대규모 격자를 사용하였다. 앞으로 한반도 주변의 대기대순환 모의 규모를 세밀화 하는 작업이 이루어져야 하고 그에 의존하여야 지역적인 강수량 분포 변동에 대하여 구체적으로 분석할 수 있다.

기후변화와 직접적인 관련이 있는 문제로 농업용수를 들 수 있다. 21세기의 우리 나라 토양 함수량은 잠재증발산량의 증가로 인하여 줄어들 전망이다. 따라서 작물재배에는 추가적인 농업용수량이 필요할 것이다. 이에 대해서는 강수량 증가와 토양 함수량 감소, 식물기간 등의 농업지표를 종합화하여 작물재배에 미치는 영향 또는 민감도를 분석할 필요가 있다.

현재 진행중인 기존 댐의 용수공급능력 검토는 한편으로 보기에 기후변화에 대한 대책과 무관하게 보이지만 매우 유용한 자료로 사용될 수 있다. 특히 재현기간별로 용수공급 능력을 산정하는 것은 수자원 관리 당국의 입장에서 현실적인 업무자료가 될 수 있다. 10, 20, 30년 등의 재현기간 별로 특정 지역의 용수공급능력을 파악하고 있다면, 만일 기후가 변하여 현재 30년 재현기간의 갈수량이 미래에 25년 재현기간의 갈수량이 될지라도 이러한 변동분을 기후변화에 의한 것으로 사전에 반영하면서 용수공급 업무를 전개시킬 수 있을 것이다. 우리 나라는 20년 내외의 국가수자원계획을 수립하고 있다. 이러한 상황이라면 현재 작성된 재현기간별 용수공급 능력은 국가 수자원계획기간의 범위에서 충분한 활용성이 있다.

1997년 8월 19일부터 21일 사이에 서해안 해수범람은 목포시가 92년부터 97년까지 87억여원을 들여 축조한 바닷물 방지턱을 무용지물로 만들었다. 비록 태풍에 의한 파고 증대와 사리에 가까워지는 시점이 일치하여 발생했다고 할지라도 21세기의 해수면 상승이 우리 나라에도 엄청난 재해를 불러일으킬 수 있음을 보여주는 사례이다. IPCC의 예측대로 2100에 현재보다 약 66 cm의 해수면 상승이 현실화된다면 서해안 해안선은 육지 쪽으로 크게 이동할 것이다. 해수면 상승으로 인한 영향은 비단 이와 유사한 연안재해로 그치지 않을 것이다. 21세기에는 해안지역 관리계획을 해안공학적, 환경적, 경제적, 법적 측면에서 수립하고 기후변화 상황에 맞추어 구체적으로 실현해나가야 할 것이다.

엘니뇨는 우리 나라에 간접적인 영향을 미치고 있지만 저위도 지역을 중심으로 전세계적인 기상 재해를 야기시키고 있을 뿐만 아니라 사회, 경제적 파급효

과 또한 막대하다. 그리고 '93~'94년의 우리 나라 가뭄은 전체 국가경제에 커다란 장애를 일으켰다. 이러한 기상 상황은 국가적인 예보가 필요한 시점에 이르렀다. 그러므로 엘니뇨와 가뭄에 대비한 기상 및 경제

정보를 생산, 수집하여 6개월~1년 내외의 예보를 수행할 수 있는 체계를 조직적으로 구축할 필요성이 있다. ●

〈참고문헌〉

김승, 김현준 (1994). "기후변화가 한국의 수자원에 미치는 영향." 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움, 한국과학기술연구원, pp. 23-46.

김영준, 박희경, 이종범, 임원근, 정관영, 윤순창 (1997). 이상가뭄에 대비한 신기술 개발 연구(1). 연구보고서 KOWACO-IPD-97-05, 한국수자원공사.

오성남 (1997). 기후변화가 한반도의 농업과 수자원에 미치는 영향 예측: GCM 시나리오 분석, 한국과학재단 한연산연구교류회, pp. 1-25.

오재호 (1994). "한반도 강수량 변화 예측 시나리오." 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움, 한국과학기술연구원, pp. 1-21.

이병렬 (1994). "기후변화에 따른 농업기후지대, 작물재배기간 변동예측." 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움, 한국과학기술연구원, pp. 49-74.

Binnie, C.J.A., and Herrington P.R. (1992). "Effect of climatic change on water resources and demands." Engineering for climate change, Thomas Telford, UK, pp. 55-75.

Gleick, P.H. (1987). "Global climate changes and regional hydrology: impact and responses." The influence of climatic variability on the hydrologic regime and water resources, International Association of Hydrologic Sciences, pp. 389-402.

Hewett, B.A.O, Harries, C.D., and Fenn, C.R. (1993). "Water resource planning in the uncertainty of climate change: a water company perspective." Engineering for climate change, Thomas Telford, London, pp. 38-54.

Kattenberg, A., Giorgi, F., Grassl, H., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Tokioka, T., Weaver, A.J., and Wigley, T.M.L. (1996). "Climate models-projections of future climate." Climate change 1995, pp. 285-357.

Masukura, K., and Yoshitani, J. (1992). "Evaluation of possible precipitation change over Japan and discharge variation in the Tone river." Proceedings of the workshop on the effects of global climate change on hydrology and water resources at the catchment scale, Japan-U.S. Committee on Hydrology, Water Resources and Global Climate Change, Japan, pp. 221-232

Mimikou, M.A., Kouvopoulos, Y.S., and Hadjissavva, P.S. (1993). "Regional climate change impact on hydrology and water resources: a case study from Greece." Diachronic climatic impacts on water resources, Springer-Verlag, Germany, pp. 231-250.