

지구환경의 변화에 따른 한반도 수자원환경의 변화 연구와 관련하여

- 중규모 대기-수문 접합 모형을 중심으로 -

윤용남 (고려대학교 토목환경공학과 교수)

이재수 (전주대학교 토목환경공학과 조교수)

유철상 (고려대학교 환경공학과 조교수)

김재형 (고려대학교 토목환경공학과 대학원 박사과정)

안재현 (고려대학교 토목환경공학과 대학원 박사과정)

1. 서론

세계 각국들이 자연적 또는 인간에 의해 야기된 지구환경변화와 사회, 경제와의 연관에 지대한 관심을 가지고 있다. 비록 지구가 수백 만년에 걸쳐 변화되어 왔지만, 남극의 오존감소, 대기권에서의 이산화탄소의 증가 그리고 다른 오염가스의 증가와 같은 최근의 급격한 변화는 인간활동이 지구시스템에 영향을 미치고 또 영향을 받음을 보여주고 있다.

지구환경의 변화는 우선 지구의 평균 온도변화에서 살펴볼 수 있다. 지구의 온도는 지구에 입사한 태양에너지와 대기에서 우주로 향한 적외 방사에너지의 열수지로부터 결정된다. 지표면으로부터의 적외 방사가 대기중의 적외 활성가스에 흡수되고, 다시 지표로 방사되는 에너지가 많기 때문에 지표는 적절한 기온을 유지할 수 있게 된다. 이 대기의 효과를 온실효과라고 부르고, 이 작용에 관계하는 대기중의 기체를 온실기체라고 부른다. 주요한 온실기체에는 이산화탄소, 메탄, 오존, 프레온, 수증기 등이 있다. 온실효과에는 수증기가 가장 큰 영향을 미치고 다음으로 이산화탄소가 큰 영향을 미친다.

수증기는 자연상태로 존재하는 온실기체로서 인간 활동과는 무관하다. 문제가 되는 것은 인간활동에 수

반해서 방출되는 온실기체의 급증이다. 이는 이산화탄소 등의 증가 영향으로 기온이 상승하게 되면, 포화증기압이 상승하게 되고, 이에 따라 대기중의 수증기 양이 증가해서 온실효과가 증폭될 가능성이 크기 때문이다. 인간 생활에 따라서 방출되는 대표적인 온실기체로는 이산화탄소, 메탄, 아황산질소, 프레온, 대류권오존 등이 있다. 현재의 이산화탄소 농도는 석탄, 석유등 화석연료의 연소가 그 원인인 것으로 알려져 있다. 최근의 대기중 이산화탄소의 증가량은 연간 약 34억톤 정도이며, 인간활동에 의한 이산화탄소 배출량은 연간 약 70억톤 정도까지 도달하고 있다. 과거 100년간 대기 중에 방출됐던 이산화탄소의 약 2/3은 화석연료의 소비로부터, 나머지 1/3은 삼림과 초지의 파괴에 의한 것이다. 현재 전체 방출량의 약 40%가 대기 중에 남아 있는 것으로 알려져 있다. 이 온실가스의 영향 때문에 대류권에서의 에너지 수지가 새로운 상태로 변화하고, 결과적으로 지구온난화가 발달되기도 하며, 또 기후변화가 발생하게 된다.

현재 지구온난화는 국제적으로 인정되고 있고 지구온난화의 방지를 위해 구체적인 방안들이 검토되고 있지만 국가간의 경제, 에너지 문제 등에 직접적으로 관계되어 있기 때문에 해결이 어려운 문제이다. 지구 전체적으로 방출되는 이산화탄소의 양은 적극적으로

줄인다고 하더라도(IPCC 시나리오 C 또는 D의 경우) 이산화탄소의 농도가 현재의 2배 정도가 되는 것을 피하는 것이 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서 이러한 온난화의 영향을 예측하고, 또한 그 피해를 최소화하기 위한 대책의 강구가 필요하게 된다.

지구 온난화가 수자원에 미칠 수 있는 영향은 지구 상의 기후 및 물 순환의 변화에서 찾아볼 수 있다. 온난화에 따라 강수량 및 강수특성과 증발량 등이 변화하면 유역에서의 물 순환도 변하게 된다. 이러한 변화는 수자원 부존량의 변화와 홍수 및 가뭄의 빈도에 영향을 미칠 수 있다. 현재의 수자원 계획(이수 및 치수 계획)이 기왕의 수문통계량에 기초하여 입안되어 있어 기후변화에 따른 강우 특성의 변화 등의 영향은 고려되고 있지 않다. 기후변화의 영향을 수자원 계획에 반영시키기 위해서는 유역규모 강우량 및 강우특성의 변화와 이에 따른 수자원 부존량의 변화를 예측해야 할 필요가 있다.

2. 지구 온난화에 관한 연구

(1) 지구온난화 현상

기후변화에 관한 국가간 협의체(International Panel on Climate Change, IPCC)는 지구 평균온도의 상승을 사실상 인정하고 있다. 이러한 온도의 변화가 온실기체의 증가에 의한 것인지, 기후의 변동에 의한 것인지에 대해서는 명확히 판단할 수 없지만 그 관련성을 부정할 수는 없다. 지구 평균온도의 추정방법에 문제가 없는 것은 아니나 지상기온의 경우 과거 100년간 0.5℃ 상승한 것으로 알려져 있으며, 해수면의 경우는 과거 100년간 10cm 상승한 것으로 알려져 있다. 최근의 온도 상승 폭은 과거 그 어느 때보다도 높게 나타나고 있다.

(2) 기후변화가 유발하는 영향에 관한 예측

기후변화를 예측하는 모형은 크게 세 가지로 분류된다. 첫째로는 에너지 수지 모형을 이용하는 방법이다. 즉, 지구표면 온도를 고른 상태로 보고 태양복사와 지구로부터의 방사에 대해 에너지 보존 법칙을 적

용하여 지구전체의 평균 온도변화를 예측하는 방법이다. 둘째로는 방사대류모형을 이용하는 방법이다. 이 경우는 지구 전체의 대기를 대표하는 공기 기둥을 가정하여 연직 방향으로 복수의 대기층을 두고 대류에 의한 에너지의 순환을 고려하게 된다. 하지만 이 경우에도 수평방향의 대기 이동은 고려하지 않는다. 마지막으로 대기순환모형을 들 수 있다. 이 모형은 지구의 대기를 3차원의 격자로 분할하고 질량, 수증기, 열에너지, 운동량의 각 보존식으로 부터 대기의 운동을 해석하는 것이다. 대기순환모형은 전술한 두 가지 모형에 비해 정도 있는 결과를 얻을 수 있으나 컴퓨터의 속도, 용량 및 운용상의 제약으로 격자의 크기가 대략 300km×300km 정도의 것이 사용된다.

현재 이산화탄소 농도 증가에 따른 지구 규모에서의 기후변화에 관한 수많은 연구가 행해지고 있다. 이러한 연구는 대부분 GCM (General Circulation Model)에 의한 수치 모의에 의존하고 있으며, 지표면, 해면의 경계조건, 해양의 고려, 눈에 대한 고려 등에 따라 그 결과에 차이를 보이고 있다.

각종 연구결과를 종합적으로 판단하면, 이산화탄소의 2배 증가에(온실가스의 연간 증가율이 유지될 경우 약 70년 후에 이산화탄소의 농도가 2배가 된다) 의한 기온의 상승량은 지구평균으로 대략 1.5℃-4.5℃의 범위로 나타나고 있다. 해양의 순환을 포함하는 모형에 의한 결과에서도 지구평균 온도는 현재보다 약 1.3℃-2.3℃ 상승하는 것으로 예상하고 있다. 모형간 기온 상승량의 차이는 주로 구름의 영향을 매개 변수화하는 과정에서 발생한다고 알려져 있다.

이산화탄소의 증가에 따른 기온의 상승은 증발을 가속화하고 대기 수증기량을 증가시킨다. 따라서 물 순환은 더욱 활발해지게 되고 강수량의 증가를 가져오게 되며(GCM의 해석결과에는 이산화탄소가 2배로 될 경우 강우량은 지구전체적으로 4-15% 증가), 이때 강우의 증가는 주로 대류성 강수에 의한 것이다. 열대성 저기압의 변동은 그 발생이 구름의 취급방법 등에 따라 크게 영향을 받으며 따라서 지구온난화에 따른 열대성 저기압의 변동을 GCM을 이용하여 찾는 것은 현 단계에서 거의 불가능하다고 알려져 있다. 과거의

통계자료에서도 온난기와 한랭기의 열대성 저기압의 발생에는 특징적인 변화는 없는 것으로 나타나고 있다.

3. 중규모 또는 소규모 지면-대기 접합모형의 필요성

근래의 지구온난화 관련 연구는 어느 정도 정확도도 가지고 있으며 또한 정량적인 현상 파악이 가능한 GCM을 이용해서 수행되고 있다. 이때 온실가스의 농도는 모형의 강제항으로 작용시켜 기상 및 수문 제 현상의 동향을 탐색하는 방법을 취하고 있다. 그러나 강우의 경우는 세부적인 지형에 영향을 받으며, GCM의 격자 크기(현재 이용되고 있는 GCM은 공간 해상도가 수백 km인 결과를 제공하고 있다) 보다도 작은 규모에서 발생하기 때문에 한반도나 한반도 내 하천유역의 강우특성 등을 GCM 결과에서 찾아 볼 수는 없다. 따라서 지구 온난화에 따른 유역규모의 강우량과 유출량과 같은 물 순환의 변화를 살펴볼 수 있는 방법이 필요하게 된다.

유역규모의 물 순환의 변화를 살펴볼 수 있는 방법은 몇 가지로 분류할 수 있다. 그 첫 번째 방법은 회귀법으로서 어떤 장소에서의 기온과 습도, 풍속 등과 같은 기상자료를 강수상황과의 관계로 회귀적으로 결부해서 강수에측을 하는 경우이다. 두 번째 방법은 과거 기압배치형 등의 기상패턴과 강수량의 관계에 대해서 해석하고, 이것을 GCM 결과에 적용하여 강수량의 변화를 예측하는 방법이다.

그러나 위의 방법도 강우 등 물 순환의 변화를 공간적으로 살펴볼 수는 없다는 단점이 있다. 따라서 기후 변화가 한반도와 같이 좁은 범위에서 대기와 수문량에 주는 영향을 명확하게 하기 위해서도 지형변화의 영향 표현이 가능한 중규모 모형을 개발하고 이것을 GCM 출력에 대해 적용시킬 필요가 있게 된다. 이를 위해서는 GCM의 격자로 표현된 영역 중 임의의 영역에 좀더 세밀한 격자를 가진 중규모 모형을 얹히는 방법(Nesting)을 이용해야 한다.

4. 중규모 대기-수문 접합모형과 관련한 연구 동향

중규모의 대기-지면 접합모형에 관한 연구는 미국, 유럽 등에서 최근에 활발하게 이루어지고 있다. 과거 기상분야에서의 중규모 모형은 주로 기상분야의 제반 문제들을 해석하는데 이용되어 왔으나 최근 지표면 과정의 중요성이 부각되면서 대기와 지표면의 상호작용과 관련한 연구가 수문 및 기상분야에서 동시에 이루어지고 있으며, 이 분야를 소위 수문기상학이라고 분류하고 있다. 이 분야는 수문분야와 기상분야의 고리역할을 담당하는 분야로서 지면과 대기 사이의 물리과정을 밝히고, 모형화하며 또한 적절한 매개변수의 추정 및 정량화 등을 포함한다. 중규모 대기-수문 접합모형은 이들 과정을 수치해석방법을 통해 정량적으로 해석하려는 시도로 볼 수 있다.

미국의 경우는 몇몇 대학과 연구소를 중심으로 기상과 수문이 결합된 중규모모형의 개발과 적용이 이루어지고 있는 상태이다. 모형의 적용은 과거의 대규모 가뭄이나 홍수 등의 이상기상을 보다 정량적으로 해석하여 이해해 보려는 경우와 지구온난화에 따른 영향을 GCM결과를 경계조건으로 하여 평가해 보려는 시도로 나눌 수 있다. 대표적인 연구는 U.C. Davis 토목공학과의 Kavvas와 Tan이 대기-수문 연계모형을 캘리포니아를 중심으로 적용해 보고 가뭄의 해석에 응용한 경우와 캘리포니아 대학의 Lawrence Livermore 국립시험소에서 개발한 국지기후시스템모형(중규모 대기모형, 토양-식물-눈 모형에 분포형 수문모형을 결합)을 캘리포니아에 적용한 예를 들 수 있다. 위의 두 경우에 있어서 모형의 해상도는 20km x 20km이다.

일본의 경우는 일본 토목연구소를 중심으로 U.C. Davis 토목공학과의 Kavvas 교수와의 협력 하에 공동연구로 GCM에서 얻어진 결과를 경계조건으로 하여 일본열도를 포함하는 좁다 세밀한 현상을 찾는 중규모 수문-기상 모형을 개발하였다. 이 모형에는 중규모 모형의 60km 격자모형과 소규모 모형의 20km 격자 모형이 있다. 20km 격자모형은 60km 격자모형에서 얻은 결과로 20km 모형조건으로 복잡하게 변화하는 지

표면 조건을 반영시킨 것이다. 이 모형은 과거 기상현상에 대해 적용하여 검증하였으며 이산화탄소가 현재의 두배가 될 경우에 강우, 증발 등 수문순환의 변화를 예측하는데 이용되었다.

국내의 경우 중규모모형 관련 연구는 기상학 관련 분야에서 이루어져 왔다. 그러나 이러한 국내의 연구는 기상분야의 제반 문제를 위한 것이었고 수문분야와의 연결은 되고 있지 못한 실정이다. 최근에 고려대학교 방재과학기술연구센터에서는 U.C Davis 토목공학과와 Kavvas교수 연구팀 및 일본 토목연구소와의 협조아래 한반도를 대상으로 하는 중규모 대기-수문 결합모형의 개발 및 적용에 관한 연구를 수행하고 있다.

5. 결 론

지구환경은 끊임없이 변하고 있으므로 20세기에 비추어 볼 때 21세기는 상당히 다르게 변할 것이다. 이러한 변화의 일부는 인간이 통제할 수 없는 자연적인 현상의 결과이고 사실 현재의 과학으로 이해할 수 없는 과정이 많이 있다. 이러한 지구의 변화는 또한 이제 겨우 이해되기 시작하는 인간활동의 결과이기도 하다.

최근 우리 나라뿐만 아니라 외국에서의 가뭄의 지속은 사회, 경제적으로 심각한 영향을 주며, 특히 아프리카 Sahel에서와 같이 기후변화로 인해 발생할 수 있는 인간의 비극을 적나라하게 보여주고 있다. 더군다나 남극의 오존구멍과 인간이 만든 Chlorofluorocarbons(CFC.s)과의 관계 그리고 지구온난화 효과에 대한 인간의 역할에 대한 논쟁들은 각국에 있어 해결해야할 여러 문제 중 환경문제의 중요성을 더해주고 있다.

기후 및 수문 시스템은 물과 온도의 지구상의 분포를 지배하는 대기, 대양, 그리고 지표면 과정을 포함하고 있다. 지구표면과 대기사이의 물과 에너지의 교환은 공간과 시간의 다양한 범위 안에서 이러한 과정들에 의해 조절되어 진다. 대기에서 지구온난화가스의 증가는 지구상의 태양복사에너지를 균형을 변화시

킨다. 태양복사에너지를 어떻게 기후변화로 나타나는지는 기후 및 수문 시스템의 자연적인 반응의 기능이라 할 수 있다.

각 국가의 효과적인 정책결정은 지구 온난화가스의 증가에 의해 야기되는 기후 변화를 예측하는데 있어 기후 및 수문 시스템에서 이러한 자연변화를 고려할 수 있는 능력을 요구한다. 지구온난화가스의 대기권에서의 증가로 인한 기후변화(온도, 강우, 기상양상의 변화)의 규모와 시간의 정확한 예측은 다음과 같은 지구시스템의 이해에 대한 불확실성에 의해 제한되고 있다. 즉, 1) 어떻게 구름이 지구의 태양복사에너지 균형을 변화시키는가?, 2) 어떻게 대양과 대기사이의 물, 운동량, 그리고 열의 교환이 변화하는가?, 3) 어떻게 물 및 에너지의 교환이 지표커버의 변화에 의해 영향을 받는가?, 4) 어떻게 기후 및 지표수문이 상호작용을 하는가? 등이다.

기후에 대한 예측능력은 기후 및 수문 시스템을 지배하는 서로 다른 과정들에 대한 이해의 부족으로 제한되고 있다. 대양에서의 열의 저장과 방출, 대규모 및 중소규모의 구름형성을 지배하는 역학, 지표면 변화의 영향, 그리고 대기중 수증기의 조절 등이 현재 기후모형화에 있어 제대로 이해되지 않는 과정들의 예이다. 기후 및 수문 시스템의 복잡한 반응들에 대한 예측은 다양한 범위의 시간 및 공간규모에 있어 관련된 과정들을 적절하게 고려한 모델의 개발을 통해서만 이루어질 수가 있다. 이러한 모델들은 궁극적으로 대기, 대양, 지표가 조합되어야 하고 시스템의 조합된 요소 안에서 제대로 작용하는 개개과정들을 적절히 표현할 수 있는 여러 개의 하부모델들을 포함하게 된다.

이러한 불확실한 기후시스템에서 정책결정에 도움을 주기 위한 정확한 기후예측을 하기 위해서는 다음과 같이 대규모 또는 중소규모의 자료에 대한 관찰, 관련된 각 과정들에 대한 연구, 그리고 모형화와 예측 과정이 이루어져야 한다. 대기, 대양, 지표면의 상태를 규정할 수 있는 대규모 자료는 원격측정장치나 기상위성 등을 이용하여 측정할 수가 있으며 태양복사에너지, 구름, 식물, 눈의 덮음, 대기 및 해양표면의

온도, 해수위 변화, 바람, 대기수분 등을 측정한다. 또한 토양수분, 강우 등의 자료측정도 필요하다. 이러한 모든 변수들은 기후 변화를 나타내는 중요한 지표이거나 관련연구 및 수치모형의 모형화를 위한 중요한 자료가 된다.

이러한 불확실한 지구시스템에서 인간활동을 포함하여 좀더 나은 예측을 할 수 있다면 상업, 농업, 에너지, 자원이용과 인간의 생활안정에 유익한 계획을 효율적으로 세우는데 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

아직까지 우리 나라에서는 기후 및 이와 관련한 수문모형이 없으며 국부적인 강우유출 모형만을 사용하고 있어 기후 및 기상변화로 인한 우리 나라에서의 기온 및 강수량의 변화, 이로 인한 가뭄과 홍수기간 및

규모에 대한 분석, 그리고 지표와 대기간의 물과 열의 재교환 등을 분석할 수가 없는 실정이다.

따라서 국내에서는 대규모 기후변화모의모형인 General Circulation Model(GCM)으로부터 관련자료를 이용하여 우리 나라에서의 기후 변화에 대한 분석을 할 수 있고, 이와 관련하여 강우의 예측과 강우에 따른 유출까지 모의할 수 있는 전반적인 기후 및 수문예측 시스템의 구축이 필요하다고 여겨진다. 이러한 시스템은 한반도내 수자원의 공간적 및 시간적 분포 변화 양상을 분석 예측하여 수자원의 이용에 관한 정책결정에 도움을 줄뿐 아니라 홍수재해 방지도 활용될 수 있을 것이다. ●

〈참고 문헌〉

과학기술처, 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경 관련 대책 연구 I, 1994.

과학기술처, 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경 관련 대책 연구 II, 1995.

과학기술처, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발 연구 I, 1993.

과학기술처, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발 연구 II, 1994.

과학기술처, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발 연구 III, 1995.

기상청, 한국건설기술연구원, 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지엄: II. 해양, 수문학 분야, 1993.

기상청, 한국건설기술연구원, 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지엄: IV. 기후변화 예측시나리오, 1993.

김승, 기후변화와 수자원, 건설기술정보, 한국건설기술연구원, 1993.

오재호, 홍성길, 대기중 CO2 증가에 따른 한반도 강수량 변화, 한국수자원학회논문집, 28권, 3호, pp. 143-157, 1995.

건설성 토목연구소, 지구 온난화가 일본지역에서 수문순환에 미치는 영향의 예측에 관한 연구 보고서, 1996.

Anderson, M. L., M. L. Kavvas and M. D. Mierzwa, Using a Simplified Climate Model with Combined Atmospheric-Hydrologic Processes for the Study of Drought, Pacific Rim Hydroclimate Workshop, 1997.

Hay, L. E., G. J. McCabe Jr, D. M. Wolock and M. A. Ayers, Simulation of precipitation by weather pattern analysis. Water Res. Res, vol 27(4) pp 493-501, 1991

Kavvas, M. L., Z. Q. Chen and L. Tan, A Coupled Regional Atmospheric-Hydrologic Model for the Study of Climate Change in California, Pacific Rim Hydroclimate Workshop, 1997.

Miller, N. L., J. Kim, Hydroclimate Downscaling Techniques for Predicting Surface Budgets and Stream Flow, Pacific Rim Hydroclimate Workshop, 1997.