

# 지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구

## An Analysis on the Variation of Hydrologic Conditions in the Korean Peninsular due to Global Warming

윤용남\* · ○이재수\*\* · 유철상\*\*\* · 안재현\*\*\*\*

### 1. 서론

최근 들어 세계각국들이 자연적 또는 인간에 의해 야기된 지구환경변화와 사회, 경제와의 연관성에 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.

지구환경은 끊임없이 변하고 있으므로 20세기에 비추어 볼 때 21세기는 상당히 다르게 변할 것이며 이러한 변화의 일부는 인간활동에 의한 결과이며 또한 인간이 통제할 수 없는 자연적인 현상의 결과이기도 하다. 현재의 과학으로 이러한 변화를 정확히 이해하고 예측할 수는 없지만 이러한 지구환경의 변화는 엄연한 현실로 다가와 있으며 세계 각국에서는 이에 따른 영향이 어떤 식으로 나타날 것인가에 대해 연구를 계속하고 있다.

본 연구는 범 지구적 환경의 변화에 따른 한반도내 수문환경의 변화를 예측해 보는 것을 목적으로 한다. 미래에 가능한 지구환경의 변화는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 CO<sub>2</sub> 증가 시나리오에 따라 기존의 대기 대순환 모형을 운영하여 얻은 결과로 나타나고, 이 결과는 한반도의 지표면 조건과 함께 한반도를 포함하는 중규모 또는 소규모의 기상-수문모형의 입력자료로 사용하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 대기 대순환모형에 의한 결과를 한반도와 같은 중, 소규모지역에 적용할 수 있도록 국외에서 개발된 모형중 적용성이 있는 모형을 선정하고 한반도의 기상, 수문자료 및 지표면 자료를 이용하여 지구환경변화의 요인이 되는 CO<sub>2</sub> 등과 같은 환경변수의 변화 시나리오에 대해 한반도에서의 기온변화, 강우, 토양수분 등의 기상·수문특성이 어떻게 변화하는지를 모의하며, 이때 얻은 결과를 분석함으로써 한반도내 수문환경의 변화에 대한 예측을 시도하였다.

따라서 본 연구에서는 먼저 대기대순환 모형의 자료를 가지고 중규모 및 소규모와 함께 지표면 특성자료와 대기 열역학을 이용하여 지표와 대기간의 에너지 및 수분의 순환을 고려하는 적절한 모형을 선택한 후, 이 모형을 한반도에 적용하기 위해 한반도에 있어서의 수문자료, 기상자료 및 지표면자료에 대한 데이터 베이스를 구축하여 한반도의 상태를 고려할수 있도록 입력자료를 구축하였다. 지구환경변화에 대한 한반도에서의 기온변화, 강우, 토양수분등의 기상 및 수문특성을 CO<sub>2</sub>의 증가 시나리오에 따라 모의한 대기대순환모형 모의 결과를 이용하여 분석하고 마지막으로 이러한 지구환경변화에 대한 한반도에서의 수문환경의 변화에 대해 분석 및 예측하였다.

---

\* 고려대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 전주대학교 토목환경공학과 조교수

\*\*\* 고려대학교 환경공학과 조교수

\*\*\*\* 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

## 2. 중규모 수문-대기모형

지구-대기 시스템에서의 관심 있는 중요한 요소는 대기와 지표 그리고 해수표면간의 상호작용이라고 할 수가 있다. 지표면과 대기사이의 열과 수분의 교환은 대기 동력학 뿐만 아니라 인간에게 중요한 기온, 상대습도, 지표 습윤도와 같은 지표면 상태를 결정하는데 있어 대단히 중요하다. 이와 같이 지표면과 대기사이에서 발생하는 과정을 지표면 과정(land surface processes)이라고 부른다. 이러한 지표면 과정은 약 10-100km의 해상도를 요구하는 중규모 대기모형보다 더 작은 수평 해상도를 필요로 한다.

그러므로 대기모형에 이상적인 지표면 경계조건을 제공하기 위해 중규모 대기모형의 계산격자 상에서 공간 평균적인 지표면 과정을 모의하는 이상적인 지표면 매개변수화가 필요하다. 한편 지표면 매개 변수화 과정과 조합된 중규모 대기모형은 강우, 토양의 함수상태, 토양으로의 침투, 토양으로부터의 추출(exfiltration), 증발산 등의 공간적 분포와 같은 이상적인 입력자료를 국지 수문모형과 유역 수문모형에 제공할 수가 있다.

이와 같이 작은 영역의 지표면 과정과 중규모 대기모형을 접목시키기 위해 Chen 등(1994a, 1994b)은 비균일 토양의 침투 및 추출을 모의하기 위한 공간 수평 평균적인 Green-Ampt 모델을 개발하여 작은 영역의 중규모 대기모형(Small Domain Mesoscale Atmospheric Model : SDMM)에 조합함으로써 증발산률과 지표면 수분상태에 대해 더욱 개선된 예측을 할 수 있는 발판을 마련하였다.

## 3. 국지규모 수문-대기모형(IRSHAM96)

Kavvas 등(1995)에 의해 개발된 국지규모-대기모형(Integrated Regional Scale Hydrology/Atmospheric Model, IRSHAM96)은 기후 사상과 같은 대규모의 대기 상태를  $10^6\text{km}^2$  안팎의 국지 규모로 전환하기 위해 개발한 국지규모(regional scale)에서의 대기-수문과정의 조합모형이다. 이 모형은 수자원과 주위환경에 영향을 주는 가뭄이나 지구 기후변화와 같은 중요한 기후 시나리오에 따른 대기-토양온도, 지표수 및 토양수분저류량, 풍속, 상대습도, 강우, 태양 복사에너지, 증발산과 침투율 등의 정보를 제공해 준다.

IRSHAM96모형은 중규모 대기모형과 국지규모 지표수문모형으로 구성되어 있으며 대기모형은 대기동력학, 수분 및 열역학의 보존방정식을 기본으로 한 정수(hydrostatic)모형이고 대기 경계층모형을 통하여 국지지표수문모형과 조합된다.

## 4. 한반도에 대한 입력자료 구축

이산화탄소의 변화에 따라 계산되는 GCM(Global Circulation Model) 자료는 약  $300 \times 300\text{km}^2$ 의 격자별로 하나의 값을 가진다. 따라서 이와 같은 격자 크기별로 계산된 값을 특정지역에서 좀더 정밀한 값을 가지게 하려면 대상지역의 특성을 반영하면서 그 격자의 크기로 줄여나가며 특성 값을 얻어야 한다.

본 연구에서 사용하게 될 IRSHAM96모형은 미국과 일본에 의해 개발된 모형으로서 일본에서  $300 \times 300\text{km}^2$ 의 격자의 GCM 자료를 먼저  $60 \times 60\text{km}^2$ 의 크기를 가지는 외부영역의 격자로 변환 한 후에, 최종적으로  $20 \times 20\text{km}^2$  크기의 내부영역 격자로 변환하여 각 격자별로 이산화탄소의 변화에 따른 여러 가지 기상 및 수문인자들의 변화를 살펴보고 분석하였다. 따라서, 본 연구에서는

IRSHAM96모형을 적절하게 우리 나라에 맞게 적용시켜서 한반도에서의 이산화탄소의 변화에 따른 기상 및 수문사상의 변화를 살펴보는 것이 주목적이 된다.

이를 위해서는 먼저 일본에 대해 설정되어 있는 격자의 범위를 우리 나라에 맞는 범위로 변화시키면서, 여러 가지 특성정보들(지형, 토지이용, 토양, 식생, 적설량 등)을 우리 나라의 자료로 변환하여 그 변화를 살펴보아야 한다. 또한 외부 및 내부영역의 모의에서 일본으로 적용되는 외부영역의 모의는 일본뿐만 아니라 우리 나라를 포함하는 동북아시아 지역을 모두 망라하고 있으므로, 그대로 일본의 모의 방법을 이용할 수 있으며 다만 내부영역의 모의시에만 적절하게 여러 자료들을 한반도의 특성을 반영할 수 있는 자료로 바꾸어서 모의하여야 한다.

따라서  $20 \times 20 \text{km}^2$  크기인 64개x64개의 격자로 실시되는 내부영역의 모의시에 격자 범위를 우리 나라로 변환시키면 대략 북위  $33^\circ \sim 44^\circ$ , 동경  $121^\circ \sim 136^\circ$  에서 모의가 이루어지게 되며, 그러므로 변환시켜야 할 특성정보들을 이 범위 내에서 같은 크기의 격자로 변환해 준다면 한반도에 IRSHAM96모형을 적용할 수 있게되는 것이다. 그러므로 본 연구에서는 각각의 특성정보들인 지형, 토양, 토지이용, 식생, 적설량 등의 자료를 우리나라에 맞게 수정한 후, 일본으로 설정되는 격자범위를 한반도에 맞게 변환해서 모형의 입력자료를 준비하였다.

## 5. CO<sub>2</sub> 변화 시나리오에 따른 수문-기상 모의결과 비교분석

이산화탄소 변화 시나리오에 따른 기상 및 수문 인자의 변화를 평가하기 위한 대상유역으로 금강유역을 선택하였으며, 평가를 위한 기준 지점으로 금강유역내에 위치하는 청주, 대전, 보은, 부여 등 4개의 기상관측소를 선정하였다.

이렇게 선정된 4개 지점별로 4월 및 5월의 조건에 맞추어 각각 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub> 조건에서의 모의 결과를 비교하였으며, 그 중에서 강우량, 증발산량 및 기온에 대한 모의 결과를 비교하여 도시한 것이 표 1~3 및 그림 1~6이다.

각각의 결과를 비교해 보면, 먼저 4월의 경우에는 강우량이 1CO<sub>2</sub>일때에 비해 2CO<sub>2</sub>일때가 감소하는 것을 알 수 있으며, 증발산량은 반대로 2CO<sub>2</sub>일때가 더 증가하고 있다. 또한 기온의 경우에는 2CO<sub>2</sub>일 때 약 2.0~2.5℃ 정도 증가하는 것으로 나타난다. 따라서 금강유역에서 4월에 대한 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>의 모의 결과에서는 2CO<sub>2</sub>일때가 강우량의 감소, 증발산량의 증가 및 평균기온의 증가를 통해 가뭄 발생의 가능성이 더 커진다는 것을 알 수 있다.

또한 5월의 경우에 대하여 각각을 비교해 보면, 강우량의 경우에는 전반적으로 1CO<sub>2</sub>일때에 비해 2CO<sub>2</sub>일때가 감소하지만 보은지점의 경우에는 오히려 증가하고 있다. 증발산량도 마찬가지로 보은을 제외한 세 지점에서는 2CO<sub>2</sub>일 때 감소하고 있으나 보은지점에서는 오히려 증가하고 있는데, 4월의 경우에 전 지점에서 증발산량이 2CO<sub>2</sub>일 때 증가했던 것에 비추어 보면 흥미로운 결과라 할 수 있다. 또한 기온은 4월의 경우에 2CO<sub>2</sub>일 때 약 2.0~2.5℃ 정도 증가했었는데 5월의 경우는 전 지점에서 약 3.5℃ 정도 증가함을 알 수 있었는데 이는 온실효과로 인한 지구 온도의 상승에 따른 결과로 생각된다.

표 1. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 4월과 5월 금강유역 기상관측소 강우량의 통계적 비교

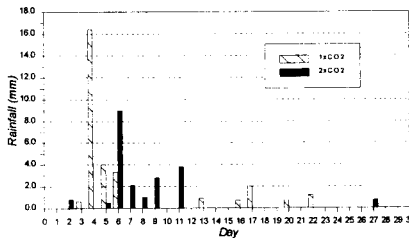
구 분		4 월				5 월			
		청 주	대 전	보 은	부 여	청 주	대 전	보 은	부 여
1CO <sub>2</sub>	일평균 (mm)	0.99	1.05	5.28	0.82	0.97	0.65	2.47	0.60
	표준편차(mm)	0.5516	0.5216	1.0416	0.4544	0.6318	0.3789	1.1311	0.3310
	무강우일수(일)	21	20	4	10	22	23	11	21
2CO <sub>2</sub>	일평균 (mm)	0.69	0.79	2.80	0.74	0.34	0.23	2.73	0.26
	표준편차(mm)	0.3262	0.3856	0.8261	0.2770	0.1033	0.0704	0.6001	0.0949
	무강우일수(일)	22	21	12	19	19	20	6	22

표 2. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 4월 금강유역 기상관측소 증발산량의 통계적 비교

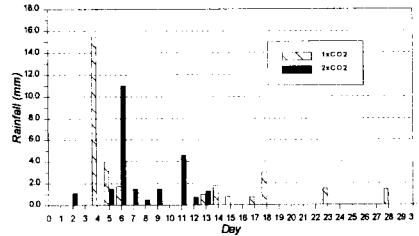
구 분		4 월				5 월			
		청 주	대 전	보 은	부 여	청 주	대 전	보 은	부 여
1CO <sub>2</sub>	일평균 (mm)	1.32	1.37	1.63	1.23	2.13	2.04	3.13	1.9033
	표준편차(mm)	0.0945	0.1167	0.1941	0.0955	0.1458	0.1200	0.2426	0.0880
2CO <sub>2</sub>	일평균 (mm)	1.46	1.43	2.01	1.45	1.91	1.84	3.55	1.77
	표준편차(mm)	0.1130	0.0961	0.2411	0.1056	0.1052	0.1109	0.2595	0.0832

표 3. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 4월 금강유역 기상관측소 기온의 통계적 비교

구 분		4 월				5 월			
		청 주	대 전	보 은	부 여	청 주	대 전	보 은	부 여
1CO <sub>2</sub>	일평균 (°C)	11.43	11.18	8.62	11.86	18.96	18.77	16.89	19.06
	표준편차(°C)	0.9325	0.9278	0.9836	0.8858	0.8376	0.8484	0.9104	0.7750
2CO <sub>2</sub>	일평균 (°C)	13.52	13.51	11.33	13.94	22.39	22.13	20.56	22.45
	표준편차(°C)	0.7821	0.7906	0.8629	0.7396	0.7214	0.6742	0.6477	0.6774

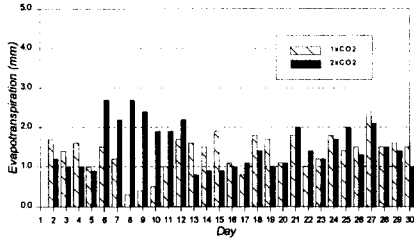


(a) 청주

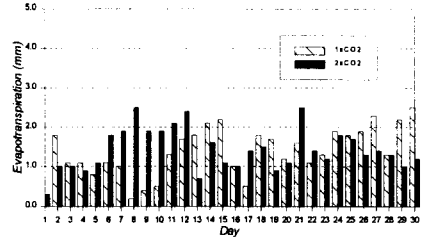


(b) 대전

그림 1. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 4월 금강유역 기상관측소 강우량의 비교

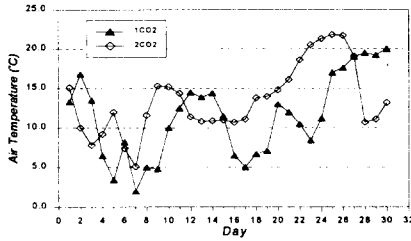


(a) 청주

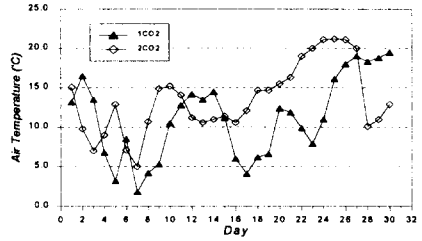


(b) 대전

그림 2. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 4월 금강유역 기상관측소 증발산량의 비교

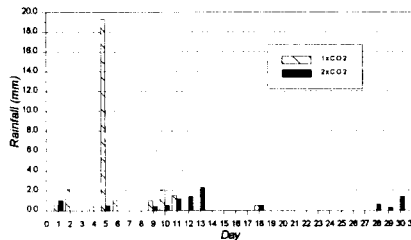


(a) 청주

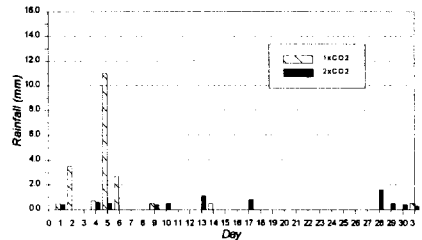


(b) 대전

그림 3. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 4월 금강유역 기상관측소 기온의 비교

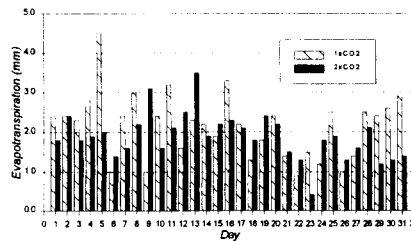


(a) 청주

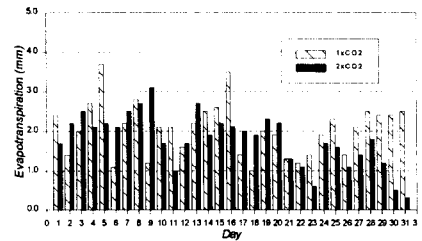


(b) 대전

그림 4. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 5월 금강유역 기상관측소 강우량의 비교

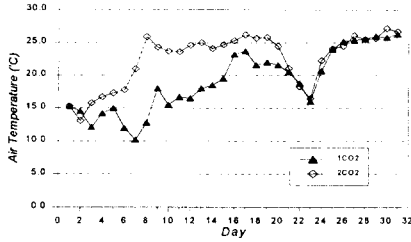


(a) 청주

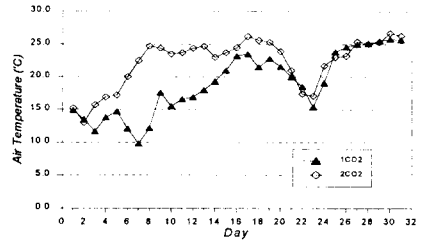


(b) 대전

그림 5. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 5월 금강유역 기상관측소 증발산량의 비교



(a) 청주



(b) 대전

그림 6. 1CO<sub>2</sub> 및 2CO<sub>2</sub>일 때 5월 금강유역 기상관측소 기온의 비교

## 6. 결론

본 연구에서는 범 지구적 환경의 변화에 따른 한반도내 수문-기상의 변화를 예측하여 월 및 연 강수량의 변화와 함께 가뭄 및 홍수의 발생빈도의 화를 분석하여 장래의 수자원계획에 도움을 주고자 하였다. 지구환경의 변화요인에는 여러 가지 인자가 작용하지만 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>의 변화만 고려하였으며 현재를 기준으로 CO<sub>2</sub>가 두 배로 되었을 때의 변화를 대기대순환모형(GCM)으로 얻은 결과를 한반도의 지표면 조건과 함께 한반도를 포함하는 중규모 및 소규모 기상-수문모형에 적용하여 분석하였다.

이를 위해 사용한 중규모 및 소규모 기상-수문모형은 미국과 일본에서 공동 개발한 IRSHAM96 모형으로 대기대순환모형으로부터 얻은 결과를 60X60km격자의 중규모로 모의한 후 다시 20X20km의 소규모로 기상-수문변화를 모의하였다. IRSHAM96모형을 한반도에 적용하기 위해 한반도의 지형, 토양, 식생, 토지이용자료 등을 구축하였으며 IPCC의 시나리오에 따라 CO<sub>2</sub>가 두 배로 되었을 때의 수문-기상 변화를 금강유역의 4개 관측지점에 대해 분석하였다.

모의는 현재의 CO<sub>2</sub> 상황과 CO<sub>2</sub>가 두 배로 되었을 때의 대기대순환 모의 결과 중 4월 및 5월에 대해 수행하였다. 모의 결과 강수량의 경우에는 1배의 CO<sub>2</sub>일 때에 비해 2배의 CO<sub>2</sub>상황일 때가 감소하는 것으로 나타나고 있으며 증발산량은 강수량과 반대로 2배의 CO<sub>2</sub>일 때 더 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 기온의 경우에는 4월에 2.0~2.5℃ 정도 증가하는 것으로 나타났고 5월에는 약 3.5℃ 정도 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같은 분석결과를 통해 CO<sub>2</sub>가 현재상태보다 두 배로 증가할 경우 강우의 감소 및 증발산량, 기온의 증가로 가뭄의 발생빈도가 증가할 것으로 판단되며, 이러한 결과는 수자원의 장기적인 계획수립에 큰 도움을 줄 수가 있다고 본다.

## 참고문헌

- Chen, Z.-Q., R.S. Govindaraju and M.L. Kavvas, Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields, 1, Development of models, Water Resources Research, 30(2), 523~533, 1994a.
- Chen, Z.-Q., R.S. Govindaraju and M.L. Kavvas, Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields, 2, Numerical simulations, Water Resources Research, 30(2), 535~548, 1994b.
- M.L. Kavvas, Z.-Q. Chen and L. Tan, Development of a Mesoscale Atmospheric Model for the Scale of Japan : Phase 4 - Climate Change Study of Japan by Fully Coupled Small Domain Hydrologic-Atmospheric Model of Japan, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis., 1995.