

# 선진국의 기후변화 연구동향( I )

## - 유출에 대한 영향을 중심으로 -

서 용 원 (서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정)

김 영 오 (서울대학교 지구환경시스템공학부 전임강사)

### 1. 머리말

1980년대 이후 지구 온난화는 전 세계의 가장 큰 관심을 끌고 온 연구주제들 중 하나였다. 1988년과 1992년 사이의 유럽 전역에 닥친 대한발과 1995년 여름 영국의 한발, 1998년 중국의 대홍수 등 잇따른 기상이변으로 인하여 지구 온난화에 대한 세인의 관심이 급속히 높아지고 있으며, 지구 온난화는 기상이변의 애매한 주범이 되고 있다. 지구 온난화에 대한 증거는 과연 존재하는가? 미래에 발생할 지구 온난화의 영향을 어떻게 예측해야 하는가? 지구 온난화에 대한 일반론은 이미 언론과 학술기사를 통해 널리 알려져 있으므로 이어지는 두 편의 글에서는 과거 선진국에서 수행한 지구 온난화의 영향평가에 대한 연구를 수자원 분야를 중심으로 검토하고자 한다.

수자원 분야에서 기후변화의 영향을 살펴본 대표적인 문헌으로 *Climate, Climatic Change, and Water Supply* (1977), *ClimateChange and U.S. Water Resources* (1990), *Proceedings of Conference on Climate Changeand Water Resources Management* (1993), *IPCC* (1990) *IPCC* (1994), *GlobalWarming, River Flows and Water Resources* (1996), *WaterResources Management in the Face of Climatic/Hydrologic Uncertainties* (1996), *Impact of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes* (1999) 등이 있으며 학회지 특별판(Special Issue)으로는 *Journal of*

*Geophysical Research*(1992)의 97권 D3호- 'Hydrological Aspects of Global Climate Change', *Climate Change* 37권 1호(1997), *Journal of the American Water Resources Association*의 35권 6호 (1999)- 'Water Resources and Climate Change' 등이 있다. 학회지 논문의 경우는 그 숫자가 방대하여 여기서는 1995년 이후 *Climatic Change, Journal of American Water Resources Association*(구 *Water Resources Bulletin*), *Journal of Hydrologic Engineering, Journal of Hydrology, Journal of Water Resources Planning and Management, Water Resources Research*에 발표된 논문은 모두 포함하였다.

선진국의 기후변화 영향평가는 대기, 수자원, 농업, 생태계, 해양, 보건 위생, 환경, 사회 경제 등 다양한 분야에 걸쳐 이루어지고 있으며 이 중 수자원은 가장 중요한 분야로 고려되고 있다. 수자원 분야의 기후변화 연구는 크게 세 가지로 요약될 수 있으며, 이는 1) 과거 강우와 유출 자료로부터 기후변화의 추세분석, 2) 미래 강우와 유출의 변화 예측, 3) 기후변화에 대비한 수자원관리 방안 등이다. 이 글에서는 그 주제를 유출에 대한 영향에 한정하여 과거 유출의 추세분석과 미래 유출의 변화 예측에 대한 연구사례를 조사하였으며, 이어지는 글에서는 기후변화와 수자원관리에 대한 연구사례를 살펴보았다.

## 2. 과거 유출의 추세분석

많은 연구자들은 지구 온난화의 영향으로 유출량의 변화와 더불어 유출시기에 변화가 발생할 것을 예측하고 있다. 이는 주로 적설량이 많은 산악지역이나 융설유출이 지배적인 지역에서 두드러지게 나타날 것으로 예측된다. 우리 나라는 몬순기후에 속해있으며 6월에서 8월 사이의 기간에 1년 강수량의 대부분이 집중되지만 미국과 캐나다의 서부, 그리고 유럽 등지에는 겨울과 봄에 큰 강수량을 보이며 여름에 작은 강수량을 보이므로 이러한 현상이 두드러질 수 있다.

Chiew and McMahon(1993)은 오스트레일리아의 30개 하천의 연평균 유출에 대한 추세를 5개의 통계학적 방법을 이용하여 살펴보았다. 사용된 방법은 각각 Mann Test, Cumulative Deviation Test, Worsley Likelihood Ratio Test, Kruskal-Wallis Test, Distribution-free CUSUM Test이다. 이 중 첫 번째에서 네 번째에 이르는 분석은 WMO에 의해 수문 시계열의 추세와 변화 감지의 기본과정으로 채택된 방법이다. 추세분석결과 전체 30개 지역 중 15개 지역에서 유의한 수준의 추세나 변화가 발견되었으며, 전체 5개 시험방법 중 한 개의 시험방법에서 유의한 수준의 추세가 발견된 지역은 12개로 나타났다. 또한 2개의 지역에서는 5개 시험방법 모두에 유의한 추세가 나타났다. 결과적으로 다수의 지역에서 지구 온난화로 인한 유출변화의 증거를 찾을 수 없었고, 이들은 이러한 결과의 원인으로 자료의 길이가 35~40년으로 짧기 때문이라고 지적하였다. Student T-test의 분석결과 자료의 길이가 길고, 연간 기후변동이 작게 나타날수록, 추세를 판단하기가 쉬운 것으로 나타났다.

Lettenmaier et al.(1994)은 미국 전역에 대한 기온, 강수량, 유출 및 일평균 온도변화 범위에 대한 추세조사를 실시하였다. 이들은 기상자료로는 1036개 관측소의 자료(Historical Climatology

Network)를, 유출자료로는 1009개 관측소의 자료(Stream Gage Network)를 이용하였다. 이 관측자료들은 일자료로 구성되어 있으며 인위적인 영향을 가정 작게 받는 자료들로서 월별 유출량으로 합쳐 계산하였다. 추세분석 방법으로는 Hirsch et al.(1982)<sup>1)</sup>이 제안한 Seasonal Kendall Test를 이용하였으며 이를 연평균 유출량 및 계절별 평균 유출량에 대해 적용하였다. 또한 추세의 정도에 대한 해석 방법으로는 Robust Slope Estimator를 사용하였으며 마지막으로 두 변수 사이의 상관성을 분석하기 위해 Bivariate Analysis와 Double Mass Curve Analysis를 사용하였다. 해석결과 3월의 미국 전역에 걸친 관측소 중 50%가 기온의 증가추세를 나타내었으며, 9월에서 12월까지의 강수량은 전체 관측소 중 25%, 11월에서 4월까지의 유출량은 전체 관측소 중 50%가 증가추세를 나타냈다. 일 온도변화 범위는 50% 이상의 관측소에서 늦봄에 시작하여 겨울까지 지속하여 증가추세를 나타냈다. 그러나 유출과 기후변수의 상관성이 일치하지는 않는 것으로 나타났다. 이들은 이러한 불일치에 대하여 기후와 수자원관리 등의 영향이 복합적으로 나타난 결과라고 지적하였다.

이외에 Changnon and Demissie(1996)은 토지 이용과 관련하여 기후변화로 인한 유출의 추세분석을 실시하였고 Burn(1994)은 Mann-Kendall Test를 이용하여 캐나다의 West-Central 지역의 하천유출에 대한 추세분석을 하였다. 추세분석과 관련한 또 다른 연구로는 Wahl(1991), Leith(1991), Kite(1992), Lins(1994), Marengo(1995), Mitosek(1995), Westmacott and Burn(1997), Leith and Whitfield(1998), Kiely(1999) 등이 있다. 표 1.에서는 추세분석에 관련된 문헌들을 요약하여 나열하고 있는데 분석방법으로 대부분 Mann-Kendall 비모수(nonparametric) 검정을 사용하고 있다.

1) Hirsch, R. M., and Slack, J. R. (1984). "A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data with Serial Dependence", *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 727-732.

표 1. 과거 유출의 추세분석 연구사례

Title	1st Author	Year	Statistical Method	Case Study	
				Area(km <sup>2</sup> )	Time Scale
Is April to July Runoff Really Decreasing in the Western United States?	Wahl	1991	Mann-Kendall	58 Gage Stations in U.S.	Seasonal
Trends in Snowcourse and Streamflow data in B.C. and Yukon	Leith	1991	Mann-Kendall	58 Gage Stations in Canada	Seasonal
Analysing Hydrometeorological Time Series for Evidence of Climate Change	Kite	1992	Stochastic Analysis	South Canada, America, East Africa	Annual
Detection of Trend or Change in Annual Flow of Australian Rivers	Chiew	1993	5 Statistical Tests	30 Catchments in Australia	Annual
Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88	Lettenmaier	1994	Mann-Kendall	America	Monthly
Hydrological Effects of Climatic Change in West-Central Canada	Burn	1994	Mann-Kendall	84 Streams in Canada	Annual
Increasing U. S. Streamflow Linked to Greenhouse Forcing	Lins	1994	Mann-Kendall	11 Rivers in U.S.	Monthly
Climate Variability and Change within the Discharge Time Series : A Statistical Approach	Mitosek	1995	Kruskal-Wallis, Mann-Kendall	World's 176 Rivers	Monthly Annual
Variations and Change in South American Streamflow	Marengo	1995	Mann-Kendall, Student t- test	7 Rivers in South America	Annual
Detection of Changes in Streamflow and Floods Resulting from Climate Fluctuations and Land Use-drainage Changes	Changnon	1996	t statistics Kendall Rank Correlation Test	4 Rivers in U.S.	Annual
Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Churchill-Nelson River Basin	Westmacott	1997	Mann-Kendall, Kendall's tau	Churchill-Nelson Basin in Canada	Seasonal Annual
Evidence of Climate Change Effects on the Hydrology of Streams in South-Central B. C.	Leith	1998	Mann-Kendall	6 Rivers in Canada	Monthly

### 3. 미래 유출의 변화 예측

'기후변화의 영향평가(Climatic Change Impact Assessment)'란 임의의 특정 기후변화 시나리오 하에서 발생할 수문현상 및 수자원시스템 거동의 예측을 의미한다. 따라서 기후변화의 영향평가는 신중하고 자세한 방법론에 기초해야하고, 평가의 모든 과정을 통해 과학적인 이론에 기초를 두어야 한다.

IPCC(1994)는 영향평가의 방법을 'Impact Approach', 'Interaction Approach', 그리고

'Integrated Approach'로 분류하고 있다. 그러나, 수자원 분야의 거의 모든 영향평가는 현재까지 'Impact Approach'가 대부분이었다. 'Impact Approach'란 기후변화라는 원인으로부터 발생하는 결과를 상호작용(Interaction)을 고려하지 않고 한 방향으로 분석하는 기법이다. IPCC는 지구온난화에 대한 영향평가를 수행하기 위해다음의 7 단계를 제시하고 있다: 1) 문제에 대한 정의(Define Problem), 2) 평가방법 결정(Select Method), 3) 방법에 대한 시험(Test Method), 4) 기후변화 시나

리오 선택(Select Scenario), 5) 영향 예측(Assess Impacts), 6) 수자원시스템의 운영변경 예측(Assess Autonomous Adjustments), 7) 적응전략 수립(Evaluate Adaptation Strategies).

기후변화의 영향평가 작업은 '현재'의 상황을 '미래'에 대한 예측과 비교하는 작업이다. 즉 기후변화가 일어났을 경우와 일어나지 않았을 경우를 비교하는 작업인데 이러한 '예측'들은 모두 시나리오에 의해 기술이 된다. 현재의 유역의 특성을 결정하는 세 가지 요소로 기후, 토지이용, 수자원운용을 들 수 있다. 주로 시나리오는 '기후요소'에 대해서만 기술하고 수자원운용 등은 불변할 것으로 가정하는데 각 요소들이 서로 영향을 끼칠 수 있으므로 세 가지 요소를 모두 고려하여 시나리오를 기술하는 것이 바람직하다.

온실가스 방출 시나리오(Emission Scenarios)는 기후변화 시나리오의 선행자료로 포함되어야 한다. 1990년 IPCC는 네 개의 방출 시나리오를 정의하였는데 이 중 하나는 BaU (Business-as-Usual) 시나리오로서 현재의 인구와 산업발전 추세가 지속되고, 온실가스에 대한 감축방안 등이 고려되지 않는다고 가정하는 시나리오이다. 나머지 세 개의 방출 시나리오인 온실가스를 감축하기 위한 정책이 고려된 시나리오이다. Kwadijk and Middlekoop(1994), Kwadijk and Rotmans(1995)는 라인강에 대한 기후변화의 영향을 살펴보았는데 이들은 BaU 시나리오와 함께 강력한 온실가스 배출 규제 정책을 바탕으로 AP(Accelerated Policy) 시나리오를 사용하였다. 이러한 온실가스 방출 시나리오를 입력자료로 하여 온도와 강수량을 예측하는 기후변화 시나리오를 작성하게 된다. IPCC(1994), Lettenmaier et al.(1996)에 따르면 기후변화 시나리오 작성방법으로 'Synthetic (Prescribed) Scenarios', 'Analogues Scenario', 'GCM-based Scenario'의 세 가지가 있으며, 이어지는 절에서 이를 이용한 연구사례를 살펴보았다.

#### (1) Synthetic Scenario를 이용한 연구

'Synthetic Scenarios'는 기후변수의 값을 임의로 변화시켜 수문모형과 수자원모형을 통해 유출과 수자원시스템의 민감도를 분석하는데 사용될 수 있다. 이 방법은 기후변화 시나리오의 예측모형이 없어도 간단히 그 민감도를 살펴볼 수 있다는 장점이 있으나 실제 미래에 발생할 기후변화의 예측에 대해서는 아무런 기여를 하지 못한다는 단점이 있다.

Ayers et al.(1994)은 Delaware 유역에 대해 기후변화에 따른 유출에의 영향을 평가하기 위해서 추계학적 일일 기후모형의 결과를 입력으로 TOPMODEL을 사용하였다. 추계학적 기후모형은 1954년에서 1988년 사이의 기후자료와 같은 통계학적 특징을 가지는 자료를 생성해내는 일을 한다. 10년마다 온도는 0.5℃씩 증가하는 60년 모의를 실시하였는데 모의결과 대부분이 유출의 감소를 보였다.

Panagoulia and Dimou(1997a, 1997b, 1997c)는 그리스의 Mesocora 유역의 기후변화에 대한 민감도를 조사하였다. 이들은 Synthetic Scenario와 GCM을 Conceptual Lumped Parameter Model과 결합하여 기후변화에 따른 홍수 일수와 홍수사이의 기간, 홍수 지속기간, 홍수량의 민감도를 조사하였으며(1997a) 또한 상이한 구조를 가지는 두 수문모형- Monthly Water Balance Model과 Conceptual Lumped Parameter Model을 함께 이용하여 Synthetic Scenario에 대한 두 모형의 유출량 및 토양함수량에 대한 예측결과를 비교하였다. Nash parameter를 이용한 결과 각각 0.864 및 0.872로 큰 차이는 없었으나, Conceptual Model이 월별, 계절별 모의에 있어 용설유출 등의 물리적 현상을 더 잘 반영하고 있는 것으로 판단하였다.

이외에 Mohseni et al.(1998)은 미국 미네소타의 온난건조한 유역과 한랭다습한 유역에 대하여 온도, 강수량, 습도 등 6개의 기후변수를 ±20%의 범위에서 변화시키며 모형의 민감도를 조사하였으며, Mehrotra(1999)는 강수량을 ±20%범위로 변화시키며 인도의 중부 3개 유역에 대하여 기후변화에 대한 유출의 민감도를 조사하였다.

표 2. General Circulation Model의 종류

국가	기관명/GCM	수평 격자크기
Canada	Canadian Climate Center/CCC	AGCM 3.7×3.7 OGCM 1.8×1.8°
Australia	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/CSIRO	625×350 km
UK	European Centre for Medium-range Weather Forecasting/ECMWF	-
USA	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/GFDL	48×40 on a gaussian grid
USA	Goddard Institute of Space Sciences/GISS	2×2.5°
France	Laboratoire du Meteorologie Dynamique/LMD	-
Germany	Max Planck Institute/MPI	-
Japan	Meteorological Research Institute/MR	AGCM 5×4° OGCM 0.5-2.0×2.5°
USA	National Center for Atmospheric Research/NCAR	2.8×2.8°
USA	Oregon State University/OSU	-
UK	United Kingdom Meteorological Office/UKMO	2.5×3.75°
Korea	Yonsei University/YONU AGCM Tr7	4×5°
Korea	Seoul National University/SNU GCM	3.75×3.75°

(2) Analogue Scenario를 이용한 연구

‘Analogue Scenario’에는 ‘Historical Analogue’와 ‘Spatial Analogue’가 있다. ‘Historical Analogue’에는 두 가지 방법이 있는데 하나는 측정자료를 사용하는 것이고 다른 하나는 고(古)기후를 사용하는 방법이다. 측정자료를 사용하는 방법은 측정기간을 온난한 기간과 한랭한 기간으로 나누어 비교하는 방법이다. 이 방법의 단점으로는 과거와 미래의 기후변화 양상이 같다고 가정하기 어려운 점과 장기자료의 부족 등을 들 수 있다. 고기후를 사용하는 방법은 지질학적, 식물학적 증거를 이용하여 과거의 환경을 재구성함으로써 이루어진다. 1990년 IPCC는 완신세, 마지막간빙기 그리고 선신세를 각각 1, 2, 4℃ 기온상승에 대한 ‘analogue’로 제시하였다. 이 방법의 단점은 정량적인 정보를 얻기 힘들다는데 있는데, Lettenmaier et al.(1996)은 이 방법의 단점으로 기후변동 요인의 차이를 든 바가 있다. 그러나 이러한 접근이 유용한 이유는 지질학적으로

추적된 홍수의 증거를 유추하여 앞으로의 기후변화로 야기될 사건에 대한 예측자료를 제공할 수 있다는 점이다.

‘Spatial Analogues’는 어떤 특정지역에 나타날 미래의 기후변화를 현재 다른 지역에서의 기후로 나타내는 방법이다. 그러나 지역적 기후특성은 대규모 순환과정과 지역적 특성의 결합으로 발생하므로 언제나 이러한 방법이 유용한 것은 아니다. 또한 서로 다른 유역의 지질학적, 지형학적 상이성으로 인하여 기후의 지역적 이동적용이 불가능할 수도 있다.

(3) GCM 시나리오를 이용한 연구

‘GCM-based Scenario’는 GCM(General Circulation Model)의 모의 결과를 이용하는 방법이다. GCM은 물리법칙에 기초하여 대규모의 축적을 가지고 기후변화를 모의하는 대기순환모형이다. IPCC의 보고에 의하면 GCM 모의 결과 현 수준에서 2배로 이산화탄소가 증가할 경우 전 세계적으로 1.5℃에서 4.5℃로 평균온도가 상승하고, 기후의 공간적 변화가 현재보다 더욱 심해지는 것으로 나타났다. GCM에 기초한 가장 간단한 시나리오는 GCM에 의해 모의된 강수량, 기온, 유출을 그대로 시나리오에 포함하는 것이다. 현재 개발되어 이용되고있는 각국의 주된 GCM을 표 2.에 정리하였다.

GCM에 사용하는 계산격자의 크기는 위도×경도의 규모가 2°×2.5° 정도로 유역의 지형학적 요소나 해안선, 식생 패턴 등의 수문학적 요소를 포함하기에는 너무 큰 규모를 가지고 있다. 그러므로, 현재의 컴퓨터 용량으로는 GCM의 단위격자(Unit Grid)의 크기(예를 들어 북위 50°에서 약 80,000km²)를 줄이는데는 한계가 있어, 수문학적 연구에서 필요한 유역

표 3. GCM을 이용한 연구사례

Title	1st Author	Year	Hydrologic Model	Case Study	
				Area(km <sup>2</sup> )	Time Scale
Sensitivity of Southeastern Inland Water Resources to Climatic Change	Miller	1990	Conceptual Model (Sacramento Model)	Upper Chattahoochee Basin in U.S.	Annual
Climatic Sensitivity of California Water Resources	Lettenmaier	1991	Conceptual Model	Sacramento-San Joaquin River in U.S.	Annual
Sensitivity of Streamflow in The Colorado Basin to Climatic Changes	Nash	1991	Conceptual Model (NWSRFS)	Colorado River in U.S.	Monthly
Seasonal River Runoff Calculated from a Global Atmospheric Model	Kuhl	1992	Direct Use of GCMs Results	World's Largest 16 Rivers	Monthly
Possible Climate Change Impacts on Water Supply of Metropolitan Boston	Kirshen	1992	Conceptual Model (NWSRFS, Ablation Model) Penman-Monteith Method	2 Rivers in U.S.	Monthly
Implications of Climate Change due to the Enhanced Greenhouse Effect of Floods and Droughts in Australia	Whetton	1993	Direct Use of GCMs Results	9 Sites in Australia	Monthly
Effects of Climatic Change in Wabash River Basin	Rao	1993	Water Balance Model	Wabash River in U.S.	Monthly
Effects of Global Warming on Hurricane-induced Flooding	Gutowski	1994	Physical Model (BRASS/DWOPER)	Florida Drainage in USA	Daily
Simulation of the Impacts of Climate Change on Runoff and Soil Moisture in Australian Catchments	Chiew	1995	Conceptual Model (MODHYDROLOG)	28 Catch. in Australia	Daily
The Impact of Climate Change on the River Rhine: A Scenario Study	Kwadijk	1995	Water Balance Model	Rhine River in Germany	Monthly
Global-Warming Effects on New York Streamflows	Tung	1995	Water Balance Model (GWLF)	4 Watersheds in U.S.	Daily
The Effects of Climate Change Due to Global Warming on River Flows in Great Britain	Arnell	1996	Conceptual Model (PDM)	21 Catchments in UK	Monthly
Estimation of Possible Climate Change Impacts on Water Availability, Extreme Flow Events and Soil Moisture in the Goulburn and Ovens Basins, Victoria	Schreider	1996	Conceptual Model (IHACRES)	14 Catchments in Australia	Daily Monthly Annual
A Regional Investigation of Climate Change Impacts on UK Streamflows	Sefton	1997	Conceptual Model (IHACRES)	39 Catchments in UK	Daily
Climate Change Hydrology and Water Resources Impact and Adaptation for Selected River Basins in the Czech Republic	Dvorak	1997	Water Balance Model (BILAN, CLIRUN) Conceptual Model (SAC-SMA)	4 Rivers in Czech	Monthly
Streamflow Response of Belgium Catchments to IPCC Climate Change Scenarios	Gellens	1998	Conceptual Model (IRMB)	8 Catchments in Belgium	Daily Monthly
Modeling The Nile Basin under Climatic Change	Yates	1998	Water Balance Model (WB Nile)	Nile River in Egypt	Monthly
Climate, Streamflow and Water Supply in the Northeastern United States	Vogel	1999	Empirical Model (Regression Model)	Northeastern US	Annual
Simulation of the Hydrological Cycle over Europe: Model Validation and Impacts of Increasing Greenhouse Gases	Arpe	1999	Empirical Model (Reanalysis data)	European Area	Seasonal
High Resolution Climate Change Scenarios: Implications for British Runoff	Pilling	1999	Physical Model (HYSIM)	Entire Area in Britain	Monthly

규모(예를 들어 약 1,000km<sup>2</sup>)에 적용하기 어렵다는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해서는 규모축소(Downscaling) 기법이 필요하다. 규모축소의 기법으로는 주로 보간법을 사용하는데 대부분의 수문모형들은 상대적으로 간단한 보간법을 사용하여 GCM 시나리오를 조정한다. 이 밖에 경험적인 관계를 통해 GCM의 결과를 작은 규모의 유역에 적용하는 방법도 있으나 대개 많은 해석을 요구한다는 단점을 가지고 있다. 또한 GCM의 결과를 경계조건으로 하여 소격자 내에서 소지역 기후모형인 Nested Model을 이용할 수도 있다. 이러한 방법은 상대적으로 정확하고 물리적인 기초 하에 기후변화를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 많은 계산시간과 제한된 시나리오의 생성, 그리고 GCM의 결과를 경계조건으로 사용하므로 GCM의 오차를 그대로 반영할 수 있다는 단점을 가진다.

GCM의 결과를 수문모형의 입력자료로 적용할 때 GCM의 기후 모의결과를 그대로 사용할 수도 있고, 단지 과거자료에 더해져 기후변화의 차이를 정의하기 위해 사용할 수도 있다. 이는 각각 GCM의 모의결과에 대한 다른 가정에서 출발하는데 전자는 GCM의 모의결과를 전적으로 신뢰한다는 가정에서, 후자는 GCM에 의해 모의된 현재 기후 결과는 신뢰할 수 없으나 변화의 폭은 신뢰한다는 가정에서 비롯한다.

후자의 연구 중 대표적인 사례로 Kwadijk and Romans(1995)는 GCM을 이용한 기후변화 시나리오를 수문모형과 결합하여 라인강 유출에 대한 기후변화의 영향평가를 하였다. 이들은 GCM의 모의결과를 현재 기후에 대한 2CO<sub>2</sub> 상태의 유럽지역 기후변화량을 정의하는데 사용하였으며 이를 수문모형인 RHINEFLOW의 입력자료로 사용하여 라인강의 유출을 모의하였다. GCM의 격자크기는 수문모형인 RHINEFLOW의 격자보다 매우 크므로 이들은 GCM 격자 하나에 포함되는 RHINEFLOW의 격자를 분리하고 이들 격자에 해당되는 기온을 관측소 관측자료를 사용하여 각 격자점에 대한 현재 기온의 공간적 분포를 정의하였다. 기후변화 시나리오

GCM 결과에 나타난 변화량을 단순히 더하는 방법(Perturbation 방법)을 사용하였다. 모의결과 라인강 전체 유역의 연평균 유출량은 거의 변화가 없었으나 겨울과 봄에는 유출 증가, 여름과 가을에는 유출 감소가 나타나며 계절별 변동이 심해지는 것으로 나타났다.

한편, Tung and Haith(1995)는 대부분의 기존 연구자들이 단순히 Perturbation 방법을 사용함으로써 미래의 일일 기상변동을 과소평가하고 있으며, 또한 지구 온난화로 인한 계절별 변화의 가능성을 무시할 수 있다고 지적하였다. 이들은 Markov Chain을 이용하여 'Wet Day' 혹은 'Dry Day'의 발생을 정하고 습윤일에는 Weibull 분포로 강수량을 결정하였다. 일일 기온은 1차의 자기상관함수를 이용하여 구하였다.

Vogel et al.(1997)은 미국의 북동부 166개 유역에 대해 다중회귀를 이용하여 유출을 모의하였다. 이들은 간단하면서도 넓은 면적에 적용할 수 있는 회귀모형의 개발을 시도하였는데, 기후변수들과 유출관계를 나타내기 위해 가장최소제곱을 이용한 다중선형회귀모형을 개발하였다. 보다 복잡한 수문모형의 결과와 비교하기 위해 이들은 델라웨어 강의 네 가지류에 대하여 기존 연구자들의 결과를 검토하였는데, 만족할만한 수준의 유사한 결과를 얻었다. 단 이들의 회귀모형은 GCM의 모의결과가 과거의 기후변동 범위 내에 들어야한다는 가정을 포함하고 있다.

그 외 GCM에 기반한 유출에 대한 연구로는 Nash and Gleick(1990), Lettenmaier and Sheer (1991), Kuhl and Miller(1992), Whetton et al.(1993), Gutowski et al.(1994), Kwadijk and Middelkoop(1994), Chiew et al.(1995), Kirshenand Fennessey(1995), Rao and Al-Wagdany(1995), Arnelland Reynard(1995), Schreider et al.(1996), Sefton and Boorman (1996), Dvorak et al.(1997), Yates and Strzepek(1998), Gellens and Roulin(1998), Pilling and Jones(1999) 등이 있다(표 3. 참조). ●

## (참 고 문 헌)

### Books, Proceedings, and Journal Special Issues

- American Geophysical Union (1992). *Journal of Geophysical Research - Hydrological Aspects of Global Climate Change*. Vol. 97.
- American Water Resources Association (1999). *Journal of the American Water Resources Association - Water Resources and Climate Change*. Vol. 35, No. 5.
- Arnell, N. (1996). *Global Warming, River Flows and Water Resources*. Institute of Hydrology, Wallingford, England.
- Ballentine, T., and Stakhiv, E. (1993). *Proceedings of First National Conference on Climate Change and Water Resources Management*, US Army Institute of Water Resources, Fort Belvoir, VA, USA.
- Dam J. C. (1999). *Impact of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes*. Unesco, Cambridge University Press, United Kingdom.
- International Panel on Climate Change (1990). *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- International Panel on Climate Change (1994). *IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations*, Words and Publications, Oxford, United Kingdom.
- Kaczmarek, Z., Strzepek, K. M., Somlyódy, L. (1996). *Water Resources Management in the Face of Climatic/Hydrologic Uncertainties*, Water Science and Technology Library, Vol. 18.
- Kluwer Academic Publishers (1997). *Climate Change*. Vol. 37, No. 1.
- Panel on Water and Climate (1977). *Climate, Climatic Change, and Water Supply*. National Academy of Science, Washington DC, USA.
- Waggoner, P. E. (1990). *Climate Change and U.S. Water Resources*, Wiley, NY, USA.

### Articles and Reports

- Arnell, N.W., and Reynard, N. S. (1996). "The Effects of Climate Change due to Global Warming on River Flows in Great Britain", *Journal of Hydrology*. Vol. 183, pp. 397-424.
- Ayers, M. A., Wolock, D. M., McCabe, G. J., Hay, L. E., and Tasker, G. D. (1994). *Sensitivity of Water Resources in the Delaware River Basin to Climate Variability and Change*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2422, USA.
- Burn, D. H. (1994). "Hydrological Effects of Climatic Change in West-central Canada", *Journal of Hydrology*. Vol. 160, pp. 53-70.
- Changnon, S.A., and Demissie, M. (1996). "Detection of Changes in Streamflow and Floods Resulting from Climate Fluctuations and Land Use-drainage Change", *Climate Change*. Vol. 32, pp. 411-421.
- Chiew, F. H. S., and McMahon, T. A. (1993). "Detection of Trend or Change in Annual Flow of Australian Rivers", *International Journal of Climatology*. Vol. 13, pp. 643-653.
- Chiew, F. H. S., Whetton, P. H., McMahon, T. A., and Pittock, A. B. (1995). "Stimulation of the Impacts of Climate Change on Runoff and Soil Moisture in Australian catchments", *Journal of Hydrology*. Vol. 167, pp. 121-147.
- Dvorak, V., Hladny, J., and Kaspárek, L. (1997). "Climate Change Hydrology and Water Resources Impact and Adaptation for Selected River Basins in the Czech Republic", *Climatic Change*. Vol. 36, pp. 93-106.
- Gellens, D. and Roulin, E. (1998). "Streamflow Response of Belgium Catchments to IPCC Climate Change Scenarios", *Journal of Hydrology*. Vol. 210, pp. 242-258.
- Gutowski, W. J., McMahon, G. F., Shluchter, S. S., and Kirshen, P. H. (1994). "Effects of Global Warming on Hurricane-induced Flooding",



- Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, No. 2, pp. 177-185.
- Kiely, G. (1999). "Climate Change in Ireland from Precipitation and Streamflow Observations", *Advances in Water Resources*, Vol. 23, pp. 141-151.
- Kirshen, P. H., and Fennessey, N. M. (1995). "Possible Climate-Change Impacts on Water Supply of Metropolitan Boston", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 121, No. 1, pp. 61-70.
- Kite, G. (1992). "Analysing Hydrometeorological Time Series for Evidence of Climate Change", *Proceedings of 9th Northern Res. Basin Symposium/Workshop, Canada*, pp. 135-149.
- Kuhl, S. C., and Miller, J. R. (1992). "Seasonal River Runoff Calculated from a Global Atmospheric Model", *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 8, pp. 2029-2039.
- Kwadijk, J., and Middelkoop, H. (1994). "Estimation of Impact of Climate Change on the Peak Discharge Probability of the River Rhine", *Climatic Change*, Vol. 27, pp. 199-224.
- Kwadijk, J., and Rotmans, J. (1995). "The Impact of Climate Change on the River Rhine: A Scenario Study", *Climatic Change*, Vol. 30, pp. 397-425.
- Leith, R. M. (1991). "Trends in Snowcourse and Streamflow Data in British Columbia and the Yukon", *Proceedings of the Western Snow Conference*, Environment Canada, Canada.
- Leith, R. M., and Whitfield, P. H. (1998). "Evidence of Climate Change Effects on the Hydrology of Streams in South-Central B. C.", *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 219-230.
- Lettenmaier, D. P., and Sheer, D. P. (1991). "Climatic Sensitivity of California Water Resources", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 1, pp. 108-125.
- Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Wallis, J. R. (1994). "Hydro-climatological Trends in the Continental United States, 1948-88", *Journal of Climate*, Vol. 7, pp. 586-607.
- Lettenmaier, D. P., McCabe, G., and Stakhiv, E. Z. (1996). Chapter 29 Global Climate Change: Effect on Hydrologic Cycle, *Water Resources Handbook*, edited by May, McGraw-Hill, NY, USA.
- Lins, H. F. (1994). "Increasing U. S. Streamflow Linked to Greenhouse Forcing", *EOS*, Vol. 75, No. 25., pp. 208-288.
- Marengo, J. A. (1995). "Variations and Change in South American Streamflow", *Climatic Change*, Vol. 31, pp. 99-117.
- Mehrotra, R. (1999). "Sensitivity of Runoff, Soil Moisture and Reservoir Design to Climate Change in Central Indian River Basins", *Climatic Change*, Vol. 42, pp. 725-757.
- Mitosek, H. T. (1995). "Climate Variability and Change within the Discharge Time Series: A Statistical Approach", *Climatic Change*, Vol. 29, pp. 101-116.
- Mohseni, O. and Stefan, H. G. (1998). "A Monthly Streamflow Model", *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 5, pp. 1287-1298.
- Nash, L.L., and Gleick, P.H. (1991). "Sensitivity of Streamflow in the Colorado Basin to Climatic Changes", *Journal of Hydrology*, Vol. 125, pp. 221-241.
- Panagoulia, D., and Dimou G. (1997a). "Sensitivity of Flood Events to Global Climate Change", *Journal of Hydrology*, Vol. 191, pp. 208-222.
- Panagoulia, D. and Dimou, G. (1997b). "Linking Space-Time Scale in Hydrological Modelling with respect to Global Climate Change Part 1. Models, Model Properties, and Experimental Design", *Journal of Hydrology*, Vol. 194, pp. 15-37.
- Panagoulia, D. and Dimou, G. (1997c). "Linking Space-Time Scale in Hydrological Modelling with respect to Global Climate Change Part 2. Hydrological Response for Alternative Climate", *Journal of Hydrology*, Vol. 194, pp. 38-63.
- Pilling, C. and Jones, A. A. (1999). "High Resolution Climate Change Scenarios: Implications for British runoff", *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp.

- 
- 2877-2895.
- Rao, A. R., and Al-Wagdany, A. (1995). "Effects of Climatic Change in Wabash River Basin", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 121, No. 2, pp. 207-215.
- Schreider, S. Yu., Jakeman, A.J., Pittock, A.B., and Whetton, P.H.(1996). "Estimation of Possible Climate Change Impacts on Water Availability, Extreme Flow Events and Soil Moisture in the Goulburn and Ovens Basins, Victoria", *Climatic Change*, Vol. 34, pp. 513-546.
- Sefton, C. E. M., and Boorman, D. B.(1997). "A Regional Investigation of Climate Change Impacts on UK Streamflows", *Journal of Hydrology*, Vol. 195, pp. 26-44.
- Sias, J. C., Lettenmaier, D. P. (1994). *Potential Effects of Climate Warming on the Water Resources of the Columbia River Basin*, Water Resources Series Technical Report No. 142, Department of Civil Engineering, University of Washington, WA, USA.
- Tung, Ching-Pin, and Haith, D. A. (1995). "Global-Warming Effects on New-York Streamflows", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 121, No. 2, pp. 216-225.
- Vogel, R. M., Bell, C. J., and Fennessey, N. M. (1997). "Climate, Streamflow and Water Supply in the Northeastern United States", *Journal of Hydrology*, Vol. 198, pp. 42-68.
- Wahl, K. L. (1991). "Is April to July Runoff Really Decreasing in the Western United States?". *Proceedings of The Western Snow Conference*, AK, USA.
- Westmacott, J. R., and Burn D. H. (1997). "Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Churchill-Nelson River Basin", *Journal of Hydrology*, Vol. 202, pp. 263-279.
- Whetton, P. H., Fowler, A. M., Haylock, M. R., and Pittock, A. B. (1993). "Implications of Climate Change due to the Enhanced Greenhouse Effect of Floods and Droughts in Australia", *Climatic Change*, Vol. 25, pp. 289-317.
- Yates, D. N., and Strzepek, K. M. (1998). "Modeling the Nile River Basin under Climatic Change", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 98-108.