

WGEN 모형과 2변수 물수지 모형을 이용한 기후변화 영향 분석

김선영*, 김병식**, 김형수***, 서병하****

1. 서론

21세기에는 지금까지의 전통적 수문학에서 다루어 오던 물 순환과정에 커다란 변동이 발생할 것으로 예상되고 있다. 이는 19세기 이후 급격한 화석에너지 사용으로 인한 것으로 대기중의 이산화탄소 농도가 급증하여 왔고 21세기에는 현재의 두 배 내외로 증가하리라 예측되고 있다. 지구대기의 온도 상승은 해양과 대기의 에너지 순환 변동을 야기하여 물 순환 양상을 크게 변화시킬 수 있다. 물 순환 과정의 변동은 곧 강수량, 증발량, 지표수 유출, 토양 함수량 등이 달라지는 것을 의미하는 것으로 미래의 수자원에 영향을 미칠 것이다. 본 연구에서는 수자원에서 기후변화 영향을 예측하기 위하여, 수문변수모의에 관한 새로운 방법을 제시하고 그 적용성을 검토하였다. 이 방법은 현재와 향후 기후변화가 반영된 강수량, 최고 및 최저온도를 모의하기 위하여 전이함수와 기존의 추계학적 일기발생 모형(stochastic weather generator)을 적용하였다. 전이함수는 저 해상도의 GCM의 광역변수들을 지역변수로 전환하여 시나리오를 작성하고, 작성된 시나리오로부터 지점 일 기상자료를 모의하기 위하여 WGEN의 매개변수를 수정하였다. 또한 기후변화가 반영된 기상자료를 TPM모형의 입력자료로 구성하여 용담댐 유역에 하천 유출량의 변동성을 기후변화 시나리오별로 유추하였다.

2. 모형의 구성

2.1 WGEN 모형의 구성

2.1.1 GCM-based 시나리오

본 연구에서는 1co2와 2co2의 YONU GCM 결과 자료를 우리나라 주변의 9개의 격자로부터 추출하였으며 1961년부터 1980년 사이에 모의된 YONU GCM 격자점의 광역규모의 변수와 대상유역의 지역 강수량과의 상호상관성을 판단하여 다변량 회귀식을 만들었다

2.1.2 GCM-based 시나리오에 의한 WGEN의 매개변수 수정

통계학적 축소기법(Statistical Downscaling Technique)을 이용하여 기후변화 시나리오를 작성할 경우 지역적 특성을 충분히 반영하지 못하는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 전이함수와 GCM에서 얻은 기후변화 시나리오를 WGEN기법을 이용하여 재 모의 하였다.

본 모형에 사용된 방정식은 기존의 Richardson(1981)이 제안한 WGEN을 보다 일반화하여 기후변화 시나리오와 지역적 특성을 반영할 수 있도록 매개변수를 수정하였다.

* 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 석사과정 (E-mail: kcivil21@hanmail.net)
** 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 박사과정 (E-mail: hydrokbs@orgio.net)
*** 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 교수 (E-mail: sookim@inha.ac.kr)
**** 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 교수 (E-mail: seohhydro@inha.ac.kr)

가) 강우요소

일 개념의 월 매개변수와 월 개념의 평균과 표준편차는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \mu_I &= N\pi\alpha\beta \\ \sigma_I^2 &\approx N\pi\alpha\beta^2\left[1 + \alpha(1-\pi) \cdot \frac{1+d}{1-d}\right] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 μ_I 는 월 강수량의 평균, σ_I^2 는 월 강수량의 표준편차, N는 월의 일수, π 는 습윤일의 비 조건부적인 확률, α, β 는 감마분포의 규모,형상 매개변수, d는 강수의 지속을 나타내는 지수이다.

위의 관계로부터 기후변화가 반영된(2CO₂)의 상황에서의 매개변수 $\alpha', \beta', \pi', d'$ 을 이용함으로써 기후변화가 반영된 강수를 발생시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\mu_I'}{\mu_I} &= \frac{\pi' \alpha' \beta'}{\pi \alpha \beta} \\ \frac{\sigma_I'^2}{\sigma_I^2} &= \frac{\pi' \alpha' \beta'^2 \left[1 + \alpha'(1 - \pi') \frac{1+d'}{1-d'}\right]}{\pi \alpha \beta^2 \left[1 + \alpha(1 - \pi) \frac{1+d}{1-d}\right]} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 prime은 2CO₂상황에서의 매개변수를 의미한다.

식(2)의 방정식을 풀기 위해서는 2개의 제약 조건식이 더 필요하다. 기후변화가 반영된 습윤일의 확률 (π')과 강수지속강도(d')는 1co2와 2co2의 비(Ratio)를 관측치에 곱해줌으로써 산정하였다. 또한 산정된 습윤일의 확률(π')와 강수지속강도(d')는 마코프 연쇄 모형의 월별 천이확률과 다음과 같은 관계가 성립한다

$$\begin{aligned} \pi' &= \frac{\pi(2co2)}{\pi(1co2)} \times \pi(obs) & \pi' &= \frac{p_{01}'}{(1 + p_{01}' - p_{11}')} \\ d' &= \frac{d(2co2)}{d(1co2)} \times d(obs) & \rightarrow & \quad d' = p_{11}' - p_{01}' \end{aligned} \quad (3)$$

위 식으로부터 기후변화 반영된 마코프 연쇄 모형의 월별천이 확률을 구할 수 있다.

나) 온도요소

2CO₂에서의 최고온도, 최저온도의 월 평균과 월 표준편차는 주기성을 고려해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_{i,j}'(t) = \mu_{i,j}' + \sum_{k=1}^{p/2} \left(A_k' \cos \frac{2\pi\tau k}{p} + B_k' \sin \frac{2\pi\tau k}{p} \right) \quad (4)$$

여기서 i는 1(Tmax), 2(Tmin) 3(Sard), j는 0(건조일), 1(습윤일), τ 는 월(Monthly), A_k 와 B_k 는 조화계수이다. 식(4)의 prime된 매개변수는 1CO₂ 와 2CO₂의 변화를 관측치에 더해줌으로써 구할 수 있다.

2.2 2변수 물수지 모형의 구성

수문모형을 결정하는데 있어 주의해야 할 점으로 모수추정, 시공간적 스케일, 모형의 검증 및 적용할 기후 변화 시나리오, 사용가능한 관측자료, 모델링 방법등이 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려해서 확정론적 월 유출모형으로서 비교적 구조가 간단한 Xiong과Guo(1999)가 제안한 Two-Parameter Monthly Water Balance Model(TPM)을 선택하였으며 모형의 수치해석적인 방법은 다음과 같다

$$Q(t) = [S(t-1) + P(t) - E(t)] + \tanh \left[\frac{[S(t-1) + P(t) - E(t)]}{SC} \right] \quad (5)$$

여기서 Q(t)는 월 유출량, S(t)는 저류량, P(t)는 강수량, E(t)는 실제 증발산량, SC는유역의 포장용수량으로

서 2변수 물수지 모형의 매개변수이다

3. 기후변화 영향 분석

3.1 기후변화에 따른 강수량, 최고온도, 최저온도 및 잠재증발산량 모의 결과

본 연구에서는 기후변화에 따른 수문자료의 변동성을 분석하고자 용담유역을 선택하였다. 강수량자료는 강수와 무 강수 사이의 천이확률을 고려한 마코프 연쇄에 GCM-based 시나리오의 강수량의 월 평균, 표준편차의 변화율을 반영하여 감마분포의 매개변수만 수정한 (Scenario A) 경우와, 첨가적으로 비 조건부적인 습윤일의 확률의 변화율까지 고려해서 감마분포의 매개변수 뿐 아니라 마코프 연쇄의 천이확률까지 수정한 (Scenario B) 경우를 고려하였다. 온도의 경우는 평균의 양적인 변화율을 고려해서 Fourio의 매개변수인 조화계수 값을 수정하였다. 또한 관측자료와 향후 모의될 사용 가능자료를 고려해서 태양복사량, 상대습도, 2m에서의 풍속 등 기상자료가 없을 경우 잠재증발산량을 산정하는 대안적인 방법으로서 Hargreaves 방법을 이용하였다. Hargreaves 방법의 적합성을 검증하기 위하여 용담유역을 대표하는 전주지점의 계기증발산량과 비교하였다. 계기증발산량의 경우, 연 평균 잠재증발산량은 1066mm이고 Hargreaves 방법을 이용했을 경우, 1055mm로 관측치와 약 11mm정도의 차이를 보여줌으로써 양호한 결과 값을 나타내었다. 표1은 GCM 시나리오에 따라 모의발생된 용담지점의 강수량, 최고온도, 최저온도, 및 잠재증발산량을 나타내고 있다.

<표1> 용담지점의 강수량, 최고기온, 최저기온 및 잠재증발산량

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
강수량 (mm)	관측치	27.8	35.0	55.5	60.7	53.5	87.3	198.9	155.0	96.0	39.0	35.2	33.1
	시나리오 A	25.9	23.7	27.7	44.4	43.5	59.9	158.1	189.2	90.0	55.8	41.9	31.4
	시나리오 B	26.6	26.1	31.7	42.5	46.0	60.8	169.4	176.6	84.9	56.8	39.9	30.4
최고기온 (℃)	관측치	3.9	6.0	11.7	19.1	24.2	27.5	30.1	31.0	26.6	21.1	13.6	6.8
	시나리오 A	6.9	8.1	14.3	21.3	26.7	31.1	32.9	32.6	30.1	24.3	15.8	9.6
	시나리오 B	6.3	8.2	14.2	20.5	26.8	31.1	32.0	32.4	30.1	24.4	16.7	9.9
최저기온 (℃)	관측치	-5.0	-3.6	0.7	6.9	12.3	17.5	22.4	22.6	16.8	9.4	3.3	-2.4
	시나리오 A	-1.5	-0.9	3.2	8.8	14.4	21.2	24.7	24.5	20.3	13.2	5.6	0.3
	시나리오 B	-2.0	-0.6	3.6	8.5	15.3	21.3	24.7	24.5	20.5	13.5	6.5	1.0
잠재증발량 (mm)	관측치	33.2	38.5	70.3	106.3	141.1	138.7	128.6	138.1	102.0	85.0	49.5	34.8
	Hargreaves	26.2	34.6	66.3	106.8	141.3	144.5	142.1	136.5	106.2	78.4	43.8	28.4
	시나리오 A	31.2	39.0	76.8	119.1	159.6	165.1	161.1	145.8	120.9	88.7	49.0	33.5
	시나리오 B	30.2	38.8	75.2	114.8	156.4	164.7	151.2	142.6	120.2	87.9	50.5	33.3

3.2 기후변화에 따른 하천 유출량 모의 결과

기후변화에 따른 유출의 영향을 분석하기 위해서 용담지점의 계산된 잠재증발산량과, 실측된 강수량 및 유출량자료를 이용해서 TPM모형의 매개변수인 SC와 C값을 결정하였다. 1978-1985년기간에 대해서 매개변수를 보정하였으며, 1970-1974년, 1994-1997년 기간에 대해서 매개변수에 대한 검증을 실시하였다. 따라서 2CO₂상태에서 모의 발생된 일 단위 강수량과 Hargreaves 방법으로 계산된 일 단위 잠재 증발산량을 월 단위로 구성하여 TPM모형의 입력자료로 사용하였다. 표2 은 용담지점의 관측치와, 향후 2CO₂상태에 따른 유출량 값을 나타내고 있다.

<표2> 용담지점의 월 평균 유출량 (단위 : mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	봄	여름	가을	겨울
관측치	25.63	30.65	53.58	60.23	53.52	78.23	193.7	156.8	101.4	36.54	36.14	32.37	167.33	428.76	174.11	88.65
시나리오 A	25.88	23.70	27.67	44.40	43.48	59.90	158.1	189.2	90.03	55.85	41.87	31.42	115.55	407.24	187.75	81.01
시나리오 B	26.59	26.13	31.71	42.51	45.98	60.80	169.4	176.6	84.86	56.84	39.88	30.42	120.20	406.74	181.57	83.14

4. 결론

본 연구의 목적은 향후 기후변화 시나리오에 의한 WGEN모형의 적용성을 검토하고 강수량 및 하천유량, 증발량 등과 같은 수문변수에 대한 기후변동의 영향을 평가하고 정량적으로 제시하는데 있다. 이러한 목적에 가장 선행되어야 할 문제로서 GCM 불확실성을 줄이는 것에 있다. 그러나 불행히도 GCM은 상당한 불확실성을 내포하고 있고 지속적인 개선이 필요한 것은 사실이다. 그러나 아직까지는 GCM이 가장 과학적인 모형이기도 하다.

(1) 강수량의 변화에 있어 연 평균 강수량은 약 +2.5 ~ +3.0 % 변화를 보였다. 이는 관측치와 약 30~35 mm의 차이로 관측치와 크게 차이가 나지 않았다. 그러나 월 평균 습윤지속기간과 건조지속기간에 있어 시나리오 A는 강우분포의 매개변수만 수정했기 때문에 관측치와의 차이가 나지 않았으나, 시나리오 B는 강수량의 상승은 건조지속기간의 감소와 습윤지속기간의 증가를 보여주었다. 최고온도와 최저온도의 연 평균기온은 +2.5 ~ +3.0 °C의 변화율을 나타냈다.

(2) 지구온난화에 따른 기온의 상승으로 인해 잠재 증발산량의 변화율을 분석하고자 Hargreavevs 방법을 이용하였다. 용담유역에, Hargreavevs방법으로 계산된 잠재 증발산량은 +10 ~ +12%의 변화율을 보였다. 이는 온도가 약 1°C 상승할 때 잠재 증발산량의 변화는 3.5%의 증감을 나타내는 것이다.

(3) 기후변화에 따른 용담유역의 유출의 변화에 있어서 연 평균 유출이 약 -6.0 ~ -9.0 %의 감소를 보였다. 계절별로는 봄과 겨울에 있어 유출의 감소를 크게 타났다. 이는 연 평균 강수량이 증가율이 미미한 반면에 잠재 증발산량이 증가로 인한 감소로 들 수 있다. 위의 결과로 볼 때 장기간의 유출을 모의할 경우 강수량의 변화가 작을 때 기온의 변화에 따른 증발산량의 변화가 유출에 많은 영향을 미칠것으로 보인다.

감사의 글

본 연구은 21세기 프론티어 연구개발 사업인 “수자원의 지속적 확보기술 개발사업단”의 연구비 지원(2-2-1)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 안재현, 유철상, 윤용남 (2001). “GCM결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석” 한국수자원학회지., 34권 4호, pp335-345
- 안재현, 윤용남, 이재수 (2001). “지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 2. 물수지 모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석” 한국수자원학회지., 34권 5호, pp511-519
- Guo, S., Wang, J., Xiong, L Ying, A and Li, D(2002) “ A Macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impact in china” Journal of hydrology, Vol(139).pp126-141
- Wilk, D.S(1992).“Adapting stochastic weather generation algorithms climate change studies” Climate change., Vol(22), pp67-84