

기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석

Analysis of River Flow Change Based on Some Scenarios of Global Warming

신 사 철*

Shin, Sha Chul

Abstract

. This study describes results of numerical simulations on river flow response due to global warming. Forecasts of changes in climatic conditions are required to estimate the hydrologic effects of increasing trace gas concentrations in the atmosphere. However, reliable forecasts of regional climate change are unavailable. In their absence, various approaches to the development of scenarios of future climatic conditions are used. The approach in this study is to prescribe climatic changes for a river basin in a simplified manner. As a rule, such scenarios specify air temperature increases from 0°C to 4.0°C and precipitation change (increase or decrease) in the range of 0% to 15%. On the basis of acceptable supposition of warming scenarios, future daily streamflow is simulated using rainfall-runoff model in the Andong Dam basin. The numerical experiments have quantitatively revealed the change of discharge at 2010, 2020, 2030 and 2050 for each warming scenarios and compared it with the results for a non-warming scenario.

keywords : global warming, warming scenario, river flow, Andong Dam basin

요 지

온난화에 의한 하천유역의 수문응답(강우유출, 특히 일단위의 유황)의 변화양상을 수치실험을 통해 정량적으로 평가하였다. 이산화탄소 농도의 증가에 따른 온난화의 진행으로 야기되는 수문학적 평가는 많은 관측자료를 필요로 하며 이를 정량적으로 평가한다는 것은 대단히 어려운 일이다. 따라서 장래의 기후를 예측하는 수단으로서 적절한 시나리오를 상정하여 평가하는 방법을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 여러 가지 상정할 수 있는 시나리오 중 기온은 0°C에서 4.0°C까지 변화하며 강수량은 15%까지 증감할 수 있다는 시나리오를 상정하여 불확실성이 큰 지구온난화의 문제에 대하여 간단하면서도 명확한 가정을 도입하였다. 따라서, 대상유역인 안동댐 유역에 대한 장래의 하천 유황은 기후변화 시나리오에서 야기되는 강수량을 발생시켜 탱크모형에 의하여 일 유황을 모의 발생하게 된다. 본 연구에서는 2030년을 이산화탄소 농도가 배증되는 시점($2\times\text{CO}_2$), 2010년, 2020년, 2050년을 각각 ($1.5\times\text{CO}_2$), ($1.75\times\text{CO}_2$), ($2.5\times\text{CO}_2$)로 설정하였으며, 이 시기에 대한 하천유황의 해석 및 온난화가 발생되지 않았을 때와의 비교 검토를 실시하였다.

핵심용어 : 온난화, 온난화 시나리오, 하천유황, 안동댐 유역

* 안동대학교 토목환경공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Andong National Univ., Kyoungbuk 760-749, Korea
(E-mail : scshin@andong.ac.kr)

1. 서 론

기후 변화에 따른 영향이 여러 분야에서 다양한 형태로 나타나고 있으며 이에 따른 온난화 방지대책이 요구되고 있다. 전세계 대기 중 이산화탄소 농도가 연간 1.0~1.5ppm정도씩 꾸준히 증가하고 있으며, 한반도의 이산화탄소 농도도 지속적으로 상승하고 있다. 지난 1958년에 최초로 대기중의 이산화탄소 농도측정이 시작된 하와이 마우나로아 화산에서의 최초 측정치는 315ppm이었으며, 1982년에는 340.9ppm이 측정되었다. 또한 1995년에는 360.9ppm이 측정되어 이는 1982년보다 정확히 20ppm이 상승한 것으로 매년 1.54ppm씩 증가한 것이다.

WMO(세계기상기구)와 UNEP(국제연합 환경 프로그램)는 1988년에 정부간 기후변화 협의회(IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change)를 조직하였으며, IPCC의 보고에 의하면 온실효과 기체의 증가경향이 현재와 같이 계속된다면 2030년에는 이산화탄소 농도 관측이 개시된 1958년의 2배에 달하게 된다. 이때 1958년을 기준으로 하여 1.2~3.0°C의 기온상승이 예상되며, 이에 따라 전지구 평균강수량 및 증발량은 2~9% 증가하고, 대류성 강우의 증가로 인하여 집중호우 및 단시간 강수량의 증가 등의 수문·기상환경의 변화가 예상되고 있다. 이러한 온난화의 수문·기상환경에의 영향, 예측의 시기, 규모, 지역양상 등에는 많은 불확실성이 내포되어 있으나, 토목공학 특히 수공학 및 수자원공학의 입장에서 본다면 현재 상정할 수 있는 온난화 시나리오를 이용하여 온난화에 의한 물순환과정의 변화 양상 및 그로 인한 유역 수문 응답의 해석은 중요하다고 생각된다.

본 연구는 지구 온난화가 진행된다는 가설을 근거로 우리나라(안동댐 유역) 하천 유역의 수자원이 장래에 어떻게 변화할 것인가를 수문학적 수치모의에 의하여 정량적으로 파악하고자 한다. 불확실성이 큰 지구온난화의 문제에 대하여 간단하면서도 명확한 가정(온난화 시나리오)을 도입하고, 기존의 유출모형과 수문자료를 이용하여, 가능한 한 해석자의 주관이 배제될 수 있도록 하여 수치실험을 실시하였다. 따라서, 여기서 활용하는 방법은 어느 정도 긴 시간의 수문자료를 보유하고 있는 하천유역이라면 즉시 적용 가능하므로 하천유황에 관한 온난화 영향의 비교연구를 수행함에 있어 유용하리라 생각된다.

2. 대상유역 선정과 수문자료의 분석

2.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 낙동강 상류에 위치하고 있는 안동댐 유역이다. 본 연구를 원활하게 수행하기 위해서는 비교적 장기간에 걸친 수문자료가 절대적이다. 일반적인 하천 유역의 경우, 유역출구에서의 장기간에 걸친 유출량 자료의 확보가 어려우며, 이 또한 정확도면에서 종종 문제가 발생한다. 이러한 상황에서 비록 산출방법이 간접적이긴 하지만 댐으로의 유입량은 하나의 유역에서 입력인 경우에 대하여 비교적 정확한 출력을 제공하고 있다고 생각할 수 있다. 특히 안동댐의 경우 약 20여년간의 유입량 자료를 보유하고 있으며, 최근 몇 년간의 연 유출을 및 홍수사상 별 유출을 분석에서 안동댐 유입량의 타당성이 확인되고 있다(한국수자원공사, 1997,1998,1999).

낙동강은 한반도의 동남부에 위치하며, 북쪽으로는 한강유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강 유역과 분수령을 형성하고 있는 우리 나라 제 2의 대하천으로서 유역면적은 23,817.3km², 유로연장은 521.5km이며 유역의 동서장은 약 120km이다. 안동댐은 낙동강 하구로부터 340km 상류에 위치하고 있으며, 하상표고는 92m이다. 안동댐을 지나 2km 하류의 좌안으로 임하댐이 위치하고 있는 반면천이 합류하며, 다시 66km를 서쪽으로 지나 우안으로 내성천이 합류한다. 안동댐의 유역 면적은 1,584km²로서 전체 낙동강 유역 면적의 6.7%에 해당하며, 연평균 강우량은 1087.0mm, 준공후 유입되는 연평균 유입량은 952.4×106m³이다. 또한 댐 상류의 하천 수계를 살펴보면 황지천과 철암천이 태백에서 합류하여 본류를 형성하고 유하하면서 경북 봉화군에서 다시 우안으로 연화천, 현동천, 춘양천이, 좌안으로 석계천, 재산천이 합류하고 안동시에서 온혜천 및 동계천이 합류하여 저수지로 유입된다.

2.2 기상요소의 경년변화

안동댐 유역에 대하여 1977~1999년에 걸친 23년간의 강우량 자료와 1980~1999년에 걸친 20년간의 월평균기온을 이용하여 월 및 연변화 양상을 고찰하였으며, 연평균강우량과 연평균기온의 경년변화를 그림 1과 2에 표시하였다.

연강우량의 변화를 보면 1990년을 전후한 2~3년간은 다우년에 속하며, 특히 1990년의 경우 6월과 9월에

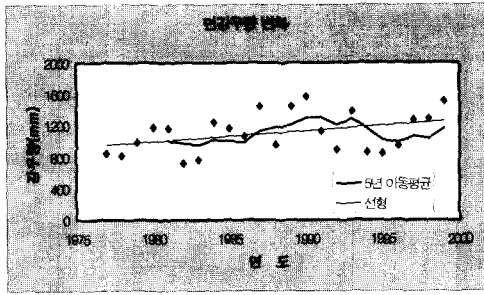


그림 1. 안동댐 유역의 연강수량 변화

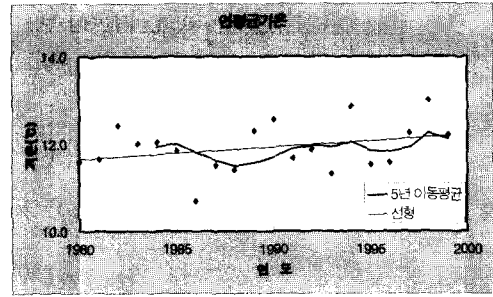


그림 2. 안동댐 유역의 연평균기온 변화

많은 양의 강우가 있었다. 반대로 1995년을 전후한 2~3년간은 가뭄해로서 지역에 따라 심각한 가뭄피해를 가져왔다. 물론 기상현상은 무작위성을 강하게 나타내고 있어 단정적으로는 말할 수 없으나 단순히 선형으로 근사시킨 경우 안동댐 유역의 연평균강우량과 연평균기온은 미소하게 증가하고 있는 것으로 볼 수 있다.

2.3 증발산량의 산정

물순환과정에 있어서 증발산은 강수와 함께 지표면의 건조와 습윤상태를 결정하는 중요한 인자이다. 증발산은 대기 중 수증기의 이동현상이므로 정확한 실제증발산량을 구하는 것은 현재 시점에서 불가능에 가까우며 많은 경험적 방법이 제안되어 왔다. 예를 들어 수증기의 흐름을 직접 해석하고자 하는 공기동역학적 방법, 증발산에는 열에너지의 소비가 동반된다는 것을 이용한 열수지법, 열수지법의 온도경사를 온도-수증기압 곡선을 이용하여 증기압경사로 변환한 Penman법, 또한 온도만을 변수로 하는 Thornthwaite법과 Hamon법 등이 제안되었다.

일반적인 경험식은 평균기온만을 변수로 하는 간단한 방법부터 보다 다양한 정보를 필요로 하는 복잡한 방법까지 다양하다. 증발산량을 기온의 함수로 표현하는 것은 방향성이 기온과 높은 상관관계가 있다는 이론적 근거를 갖고 있다. 이러한 방법은 많은 정보를 필요로 하는 방법에 비하여 몇가지의 이론적인 결점도 있으나 기온 이외의 기상요소를 얻을 수 없는 경우 유용하게 이용할 수 있다.

본 연구에서는 기온변화에 따른 증발산량의 변화양상을 이해하는 것이 하나의 목적이며, 장기간에 걸친 많은 기상요소를 수집한다는 것은 어려우므로 기온만을 변수로 하는 방법을 이용하여 증발산량을 구하기로

한다. 이러한 방법 중 대표적인 방법에는 Thornthwaite법이 있으나, 이 방법은 비교적 건조지역인 북미 지역에서 개발된 식으로 습도에 의하여 증발산량이 제어되는 지역에서는 겨울철에는 과소로, 반대로 여름철에는 과대로 산정되어지는 결과를 야기한다(樵根勇, 1988). 따라서, 다음과 같은 Hamon법(Hamon, 1961)을 이용하여 월증발산량을 산정하기로 한다.

$$PE = 0.14D_0^2 p_i$$

여기서, PE : 잠재증발산량(mm/d), D_0 : 가조시간(12hrs=1), p_i : 평균기온에 대한 포화절대습도(g/m^3)

1980년에서 1999년까지 20년간의 월평균기온을 이용하여 Hamon법에 의하여 일증발산량을 산정하고 이것에 해당월의 일수를 곱하여 월증발산량을 구하였다. 또한, 본 연구의 최종년도인 2050년까지 평균기온이 4°C 및 2°C로 선형적으로 상승한다는 시나리오에 의해 같은 방법으로 장래의 월증발산량을 구하였다. 이들에 대한 상대적인 값을 표 1에 나타내었으며, 월증발산량을 합산하여 연증발산량을 산정하고 기온상승에 의한 연증발산량의 증가비율을 구한 결과를 그림 3에 표시하였다.

2050년까지 평균기온 2°C 증가 시 연증발산량은 최대 16%의 증가와 평균적으로 12.6%의 증가를 초래한다. 또한 4°C 증가 시 최대 32% 증가와 평균 26.2%의 증가를 가져오는 것으로 분석되었다. 결국, 지구온난화의 영향으로 2050년에 현재 기온보다 4°C 증가한다면 연증발산량은 평균 26%의 증가를 초래하여 이수 측면에서 어려움을 예상할 수 있다.

2.4 유출량 계산

유출해석에 있어서 어느 정도 물리적 의미가 있으며

표 1. 기온상승에 의한 월증발산량의 변화

상승조건		2℃(▲)				4℃(▲)			
월	연도	2010	2020	2030	2050	2010	2020	2030	2050
	1		1.027	1.081	1.108	1.162	1.081	1.135	1.189
2		1.037	1.057	1.094	1.151	1.056	1.113	1.189	1.321
3		1.032	1.053	1.084	1.147	1.053	1.116	1.179	1.305
4		1.022	1.050	1.078	1.134	1.050	1.106	1.162	1.284
5		1.025	1.050	1.075	1.128	1.049	1.099	1.152	1.266
6		1.023	1.047	1.070	1.120	1.047	1.096	1.146	1.253
7		1.020	1.045	1.070	1.114	1.045	1.089	1.139	1.234
8		1.022	1.044	1.069	1.116	1.044	1.091	1.138	1.239
9		1.027	1.051	1.075	1.126	1.051	1.098	1.149	1.260
10		1.029	1.058	1.080	1.138	1.058	1.108	1.167	1.289
11		1.027	1.055	1.082	1.151	1.027	1.123	1.178	1.315
12		1.023	1.047	1.069	1.139	1.046	1.116	1.163	1.302

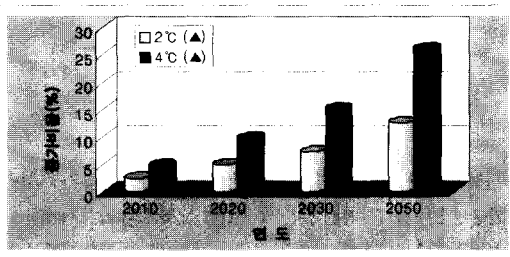


그림 3. 기온상승 시나리오에 의한 연증발산량의 변화

모형구조가 간단하고 이해하기가 용이하며, 계산이 간단하고 비교적 정확도가 높다는 점에서 Sugawara (1972, 1979)에 의해 제안된 탱크모형이 자주 이용되고 있다. 직렬탱크의 유출수문곡선은 상부의 탱크일수록 강우에 대하여 민감하게 반응하고, 하부의 탱크일수록 반응이 둔감하여 완만하게 상승 및 하강하는 성분을 표시한다. 각단의 탱크가 구체적으로 표면유출, 중간유출 또는 지하수유출의 각 성분에 대응한다고는 말할 수 없으나 상부의 탱크일수록 표면유출에 가까운 성분을, 하부 탱크일수록 지하수유출에 가까운 성분을 표시하게 된다.

이 모형은 선형응답에서 비선형응답까지의 대응이 가능하고, 단기유출에서 장기유출까지 폭넓게 이용될 수 있으나, 실제의 탱크모형에 의해 유출해석을 실시할 경우 적절한 모형변수의 결정이 어렵다는 점이 이 방법의 최대의 결점이다.

비선형함수에 대한 최소치의 탐색으로서 우수한 방법으로 알려져 있는 Powell의 공액방향법(Powell, 1964)은 탱크모형과 같이 미정계수의 수가 많은 유출모형의 변수결정에 매우 유효한 방법으로 사용되고 있다. Powell법은 응답면을 타원면이라 가정하고 공액방향으로 해를 탐색하는 방법이지만, 탱크모형과 같이 결정하여야 할 변수 값의 폭이 크게 변화할 때 이것을 그대로 탐색변수로 할 때 응답면이 극단적으로 편평하게 되어 공액방향의 결정이 어려워 수렴하지 않는 결과를 초래한다. 이러한 어려움을 극복하기 위한 하나의 방법으로 각 모형변수를 각각의 초기치로 기준화한 것을 변수로 하여 응답면을 원형에 가깝게 하는 기준화 Powell법(Standardized Powell Method ; SP법)이 제안되었다(永井 등, 1979, 角屋 등, 1980). 이들은 이러한 방법에 의하여 계산효율이 상당히 개선되었으며 저류함수법과 같은 다른 유출모형에도 유용하게 이용될 수 있다고 보고하고 있다.

본 연구에서 이용한 그림 4와 같은 직렬형 4단 탱크에는 16개의 미정계수가 있으며 1990년에서 1999년까지의 강우 유출자료로부터 SP법을 이용한 최적화기법을 실시하여 얻어진 안동댐 유역의 최적 매개변수는 표 2와 같다. 본 연구에서 유출해석의 목적은 과거 강우-유출 자료로부터 탱크모형의 모형변수를 찾아내고 강우량 증감 시나리오별로 모의 발생된 장래의 강우량 자료로부터 그에 대응하는 유출량을 산정하는 것이다.



그림 4. 직렬 4단 탱크의 구조

3. 기후변화 시나리오

3.1 시나리오의 설정

온실효과 기체의 증가 경향이 현재와 같이 계속된다면, 이산화탄소 농도가 2배로 증가하는 시기에 전 지구의 평균 기온 상승량은 1.2~3.0°C로 추정되고 있다. 또한 온실효과 기체가 현재의 증가율로 계속 증가한다면, 이산화탄소 농도는 2030년경에는 1958년 농도의 2배가 되어, 1958년을 기준으로 2030년경에는 1.2~3.0°C의 기온 상승이 발생할 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 이들을 근거로 다음과 같은 가정을 설정한다.

- ① 이산화탄소 농도변화는 현재의 증가율을 유지하는 것으로 한다.
- ② 온실효과 기체에 의한 기온상승은 1958년에서 1990년까지는 미소한 것으로 가정하여 무시하고, 1991년부터 선형적으로 증가하여 2030년에는 $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 가 된다. 본 연구의 대상구역에서의 기온 상승은 전체 지구의 평균 기온 상승인 $\Delta T=3.0^{\circ}\text{C}$ 로 한다.
- ③ 식생 및 토지이용 등의 유역조건의 변화는 없는 것으로 하고, 유출모형의 변수는 현재 상태를 유지하는

표 2. 최적계산된 탱크모형의 매개변수

1단탱크	Ca0	0.0111	Ca1	0.0321
	Ca2	0.3127	Ha1	10.956
	Ha2	52.773	초기수심	4.7616
2단탱크	Cb0	0.2289	Cb1	0.0091
	Hb	49.666	초기수심	75.250
3단탱크	Cc0	0.0011	Cc1	0.0018
	Hc	42.561	초기수심	186.4
4단탱크	Cd1	0.0002	초기수심	513.65

것으로 한다.

④ 온도변화에 따른 증발산의 변화에 의하여 유출특성이 반영된다.

⑤ 강우 시나리오에 있어서 강우량은 목표시점에서의 기온 $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 의 기온 상승에 의하여 $\Delta P\%$ 증가하는 것으로 하고 그 증가는 선형이다. 전체지구의 평균 1.2~3.0°C의 기온상승에 따라 강우량은 2~9%가량 증가하는 것으로 보고되고 있으나, 국지적으로는 감소하는 경우도 발생한다.

이상의 가정을 기준으로 본 연구에서의 기후변화 시나리오는 다음과 같이 설정한다. 기온변화량 ΔT 및 강우량 변화율 ΔP 는 연간을 통하여 일정하다는 시나리오이다. 본 연구의 대상구역에 있어서의 기후변화는 전체 지구평균과 동일한 정도의 변화량을 가정하고 있으므로 2030년에는 기온 상승량 $\Delta T=3.0^{\circ}\text{C}$ 이며 강우량 변화율 $\Delta P=-10\sim 10\%$ 로 한다.

최근, 지구온난화의 방지 대책이 전 세계적으로 확산되면서 기존의 기온 상승예측은 약간 하향 수정되어야 할 것으로 생각된다. 물론, 가장 극단적인 상황하에서의 예측은 말할 것도 없으나, 본 연구에서는 이러한 견지에서 기존의 GCM 계절변화 시나리오에서 설정한 기온 변화량보다 약간 하향 조정하였다.

본 연구에서의 수행방법에 의하면, 2030년을 이산화탄소 농도가 배증되는 시점($2\times\text{CO}_2$), 2010년, 2020년, 2050년을 각각 ($1.5\times\text{CO}_2$), ($1.75\times\text{CO}_2$), ($2.5\times\text{CO}_2$)로 설정할 수 있으며, 최종 예측년인 2050년에 있어서의 기온 상승량 $\Delta T=4.0^{\circ}\text{C}$, 강우량 변화율 $\Delta P=-15\sim 15\%$ 로 하여 표 3과 같은 총 10개의 시나리오를 설정하였다.

표 3. 설정된 시나리오

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8	case 9	case 10	case 11
$\Delta T(^{\circ}C)$	4	4	4	4	4	2	2	2	0	0	0
$\Delta P(\%)$	+15	+10	0	-10	-15	+15	0	-15	15	-15	0

3.2 수치실험의 순서

3.2.1 강수량 증감 시나리오에 의한 일단위 강수량 발생

강수량의 모의발생 기법에는 여러 가지를 생각할 수 있으나 과거에 발생했던 강우사상이 장래에 일어날 수 있는 현상들의 대표성을 갖는다는 가정 하에 가급적 단순하고 용이한 방법에 의한 모의발생을 실시한다.

N 년간의 과거 강우 자료를 1년씩 구분하여 각각 독립현상이라 가정하여 모의 발생시켜 장래의 예측강우(예측시점 K 년까지)로 한다. 그때 강우량을 연차적으로 연장하여 목표시점에서 $\Delta P\%$ 로 증감되도록 한다. 즉 제 i 년 후($1 < i \leq K$)의 강우계열(모의 발생된 예측강우 계열) $\{R_i\} = \{r_i(1), r_i(2), \dots, r_i(365)\}$ 는 과거 강우 자료로부터 난수발생에 의해 얻어진 제 j 년($1 \leq j \leq N$)의 관측 강우 계열 $\{R_j\} = \{r_j(1), r_j(2), \dots, r_j(365)\}$ 에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \{R_i\} &= \frac{\Delta P}{100} \times \frac{i}{K} \times \{R_j\} \\ &= \left\{ \frac{\Delta P}{100} \times \frac{i}{K} \times r_j(1), \frac{\Delta P}{100} \times \frac{i}{K} \times r_j(2), \right. \\ &\quad \left. \dots, \frac{\Delta P}{100} \times \frac{i}{K} \times r_j(365) \right\} \end{aligned}$$

관측된 강우 자료로부터 이상의 방법에 의하여 강수량 증감시나리오별로 2000년부터 2050년까지의 일 강우계열을 발생시킨다.

3.2.2 기후변화 시나리오에 근거한 일단위 유량의 발생

탱크모형에서 이용되는 증발산량은 유역의 실제증발산량이지만 이것을 정확하게 추정한다는 것은 대단히 어려운 일이므로 菅原正巳(1972)는 계기증발량의 월 합계를 그 월의 일수로 나누어 일평균을 구하여 무강우일은 그 일평균증발산량을 사용하고 강우일은 증발

산량을 0로 하면 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있다고 제안하였다.

본 연구의 대상유역인 안동댐 유역의 인근에 위치하고 있는 안동측후소로부터 계기증발량을 얻을 수는 있으나, 본 연구의 목적 중 하나인 기후변화에 의한 증발산량의 산정을 위해서는 기온을 변수로 하는 증발산량 산정 모형을 사용할 수 밖에 없으므로 Hamon의 방법을 이용하여 얻어진 잠재증발산량을 이용하여 탱크모형의 입력으로 사용되어질 유역증발산량을 추정한다. 통상 계기증발량은 잠재증발산량보다 크게 관측되어지므로 상술의 방법을 사용하기 전에 10년간의 물수지를 파악해 보기로 한다.

그림 5에서 알 수 있듯이 1990년부터 1999년까지의 총강우량은 11,674mm이며, 이 중 55.3%가 댐으로 유입되는 것으로 관측되었다. 장기간의 물수지에서 강우량은 유출량과 증발산량의 합이라 생각할 때, Hamon식에 의한 잠재증발산량을 직접 사용할 경우, 약 2,000mm이상 증발산량이 과다하게 산정되고 있음을 알 수 있다. 여기서, 강우일에 증발산량을 0로 가정할 경우, 증발산량은 강우량의 43.5%로 감소하여 기타 손실로서 143mm를 가정할 때 10년간의 물수지를 만족하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 Hamon식에 의한 잠재증발산량을 菅原正巳에 의해 제안된 방법에 의하여 보정한 후 탱크모형의 입력으로 사용하였다.

증발산에 의한 손실은 상단 탱크에서 순서대로 제 3단 탱크까지 손실된다. 2050년까지 선형적으로 기온상승이 생긴다는 기후변동 시나리오에 의하여 증발산은 연차적으로 증가하게 된다. 이와같은 과정을 M 회 반복 계산하고 각 연도별로 유황곡선과 갈수의 지속성, 빈도 등을 구하여 기후변화에 따른 유황을 추출한다.

4. 적용결과 및 고찰

4.1 유황의 평균치에 관한 검토

1회의 계산 수행에 있어서 1990년부터 2050년까지 각 연도별 유황곡선을 그릴 수 있다. 즉, 각 연도별 365일의 일유량계열을 큰 순서대로 나열하여 Q_1 ,

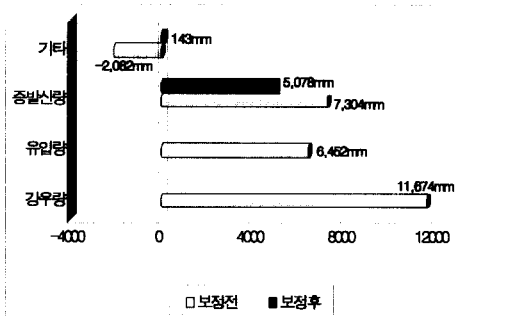


그림 5. 증발산량 보정전과 보정후의 10년간 (1990-1999)에 걸친 물수지

Q_2, \dots, Q_{365} 를 얻는다. 각 온난화 시나리오별로 그 계산을 $M=1000$ 회 반복하여 1000개의 수문곡선으로부터 온난화에 의한 유황변화를 검토하였다.

유황곡선에 근거한 순서통계량 Q_1, Q_2, \dots, Q_{365} 는 각각 1000개씩 얻어지며, 이들의 평균치 $\overline{Q_1}, \overline{Q_2}, \dots, \overline{Q_{365}}$ 를 구하여 온난화 시나리오별로 2010년, 2020년, 2030년 및 2050년의 시점에서 정리한 것이 그림 6과 표 4이다. 상위 3개, 30위, 50위, 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량에 관하여 온난화가 진행되지 않을 때, 즉 $\Delta T=0^\circ\text{C}$, $\Delta P=0\%$ 일 때의 유황에 대한 상대적인 값을 표시한 것이다.

연간 일정한 시나리오로 강우조건이 현재와 같은 조건이 유지되고 기온만이 4°C 증가하는 Case 3의 경우 등가 CO_2 농도가 2배가 되는 시점(여기서는 2030년)에는 풍수량은 11% 감소, 평수량은 10% 감소, 저수 및 갈수량은 14~19% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한

최종연도인 2050년에는 풍수량 및 평수량 17% 감소, 저수량은 30%, 갈수량은 16%의 감소를 가져온다.

온난화가 진행되고 강우량이 감소하는 경우에는 증발산량의 증가로 인하여 $\Delta P=10\%$ 일 때(Case 4) 2030년에 풍수량은 17% 감소, 평수량 이하는 26~14% 감소하게 된다. 또한 2050년에는 풍수량과 평수량은 25~26% 감소, 저수량은 약 40%의 감소를 가져온다. $\Delta P=-15\%$ 일 때(Case 5) 2030년에 풍수량은 21% 감소, 평수량 이하는 30~14% 감소하게 된다. 또한 2050년에는 풍수량과 평수량은 30% 감소, 저수량은 약 40%의 감소를 가져온다.

기온변화가 없이 강우량만이 증가한다면(Case 9) 당연히 유황은 증가하나, 기온이 2°C 상승한다면, 강우량이 15% 상승(Case 6)한다 할지라도 갈수량에서는 유황의 감소를 가져온다. 또한 기온이 4°C 상승하면 강우량이 15% 상승(Case 1)한다 하더라도 풍수량 이하의 유황은 감소한다. 따라서 온난화가 지속되어 $\Delta T=4^\circ\text{C}$, $\Delta P=15\%$ 의 상황이 발생한다면 2030년 및 2050년에는 홍수시의 유황은 10%이상 증가하여 치수 대책의 문제점 야기와 저수량이하의 유황은 약 15%가량 감소하여 이수측면에서도 어려움을 겪을 수 있음을 말해주고 있다.

4.2 최대유량에 대한 확률유량의 변화에 대한 검토

수치실험에서 각 시점별로 얻어진 1000개씩의 연최대유량 Q_1 에 대하여 빈도분석을 실시하고 재현 확률유량의 시나리오별 변화양상을 검토하였다. 각 시점 중 최종 목표년인 2050년에 대하여 시나리오별 1000개씩의 수문곡선에서 최대유량을 선택하여 빈도분석을 실

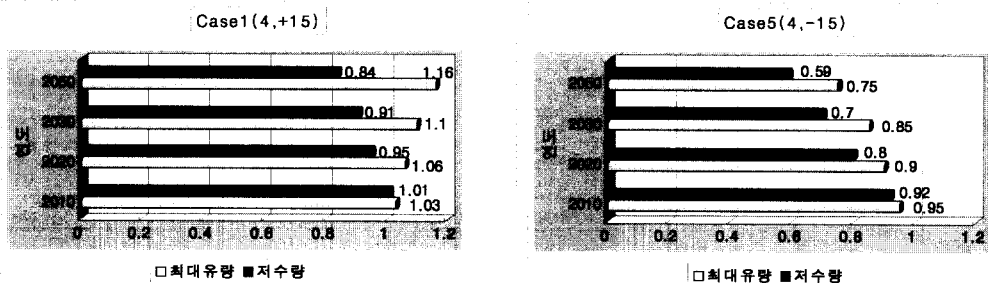


그림 6. 온난화 시나리오별 최대유량과 저수량의 변화

표 4. 각 온난화 시나리오에 의한 장래의 평균적 유황

	Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$\Delta T(^{\circ}C)$	4	4	4	4	4	2	2	2	0	0	0
	$\Delta P(\%)$	15	10	0	-10	-15	15	0	-15	15	-15	0
2010	1	1.03	1.02	0.99	0.96	0.95	1.04	1.00	0.96	1.04	0.96	1.00
	2	1.03	1.02	0.99	0.96	0.95	1.04	1.00	0.95	1.04	0.96	1.00
	3	1.03	1.01	0.98	0.95	0.94	1.04	0.99	0.95	1.04	0.95	1.00
	30	1.03	1.00	0.95	0.90	0.87	1.05	0.98	0.90	1.08	0.92	1.00
	50	1.01	1.00	0.97	0.95	0.93	1.02	0.99	0.96	1.03	0.97	1.00
풍수량	95	1.01	0.99	0.97	0.94	0.93	1.02	0.99	0.95	1.04	0.96	1.00
평수량	185	1.01	1.00	0.97	0.95	0.95	1.02	0.99	0.97	1.02	0.97	1.00
저수량	275	1.01	0.99	0.96	0.93	0.92	1.01	1.00	0.96	1.03	0.97	1.00
갈수량	355	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	1.06	1.00	1.00
2020	1	1.06	1.04	0.98	0.93	0.90	1.07	0.99	0.91	1.08	0.92	1.00
	2	1.06	1.04	0.98	0.92	0.89	1.08	0.99	0.90	1.09	0.91	1.00
	3	1.06	1.03	0.97	0.91	0.88	1.08	0.98	0.89	1.09	0.91	1.00
	30	1.06	1.01	0.90	0.78	0.74	1.11	0.95	0.78	1.17	0.84	1.00
	50	1.02	0.99	0.94	0.90	0.88	1.06	0.97	0.91	1.09	0.94	1.00
풍수량	95	1.00	0.98	0.93	0.88	0.86	1.04	0.97	0.90	1.07	0.94	1.00
평수량	185	0.99	0.97	0.93	0.90	0.88	1.02	0.97	0.92	1.05	0.96	1.00
저수량	275	0.95	0.93	0.86	0.82	0.80	1.01	0.96	0.87	1.09	0.96	1.00
갈수량	355	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.94	0.94	0.93	1.01	0.94	1.00
2030	1	1.10	1.06	0.97	0.89	0.85	1.11	0.99	0.87	1.12	0.88	1.00
	2	1.10	1.05	0.97	0.88	0.84	1.11	0.98	0.85	1.13	0.87	1.00
	3	1.09	1.04	0.95	0.86	0.81	1.11	0.98	0.84	1.13	0.86	1.00
	30	1.09	1.01	0.85	0.70	0.63	1.19	0.93	0.70	1.26	0.75	1.00
	50	1.02	0.98	0.92	0.86	0.83	1.09	0.96	0.87	1.17	0.91	1.00
풍수량	95	0.99	0.96	0.89	0.83	0.79	1.05	0.95	0.85	1.11	0.90	1.00
평수량	185	0.97	0.94	0.90	0.85	0.82	1.02	0.95	0.88	1.07	0.93	1.00
저수량	275	0.91	0.87	0.81	0.74	0.70	1.00	0.92	0.80	1.15	0.91	1.00
갈수량	355	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.88	0.88	0.88	1.01	0.89	1.00
2050	1	1.16	1.09	0.96	0.82	0.75	1.18	0.98	0.77	1.20	0.80	1.00
	2	1.16	1.09	0.94	0.80	0.72	1.19	0.97	0.75	1.22	0.78	1.00
	3	1.15	1.07	0.92	0.76	0.68	1.19	0.96	0.72	1.22	0.77	1.00
	30	1.14	1.01	0.74	0.53	0.45	1.30	0.87	0.51	1.42	0.62	1.00
	50	1.03	0.96	0.86	0.76	0.71	1.19	0.93	0.78	1.40	0.84	1.00
풍수량	95	0.98	0.93	0.83	0.74	0.69	1.08	0.91	0.75	1.18	0.83	1.00
평수량	185	0.94	0.90	0.83	0.75	0.69	1.04	0.91	0.78	1.13	0.88	1.00
저수량	275	0.84	0.79	0.70	0.61	0.59	1.00	0.83	0.66	1.24	0.81	1.00
갈수량	355	0.85	0.84	0.84	0.83	0.82	0.88	0.87	0.85	1.02	0.89	1.00

시하였다.

빈도분석을 위하여 6가지의 분포형(Normal, 2 Parameter Log Normal, 3

Normal, Pearson Type III, Log Pearson Type III, Gumbel Type I Extremal)에 대하여 검토하였으며 모두 KS(Kolmogorov-Smirnov)검정을 만족하

표 5. 재현 확률유량의 변화(2050년 기준)

	재현기간				
	10년	25년	50년	100년	200년
(0, 0)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Case 1 (4,+15)	1.146	1.153	1.159	1.167	1.176
Case 2 (4,+10)	1.091	1.097	1.102	1.107	1.113
Case 3 (4, 0)	0.978	0.982	0.983	0.982	0.981
Case 4 (4,-10)	0.861	0.860	0.856	0.823	0.841
Case 5 (4,-15)	0.800	0.797	0.790	0.781	0.769
Case 6 (2,+15)	1.157	1.162	1.169	1.176	1.185
Case 7 (2, 0)	0.990	0.993	0.994	0.994	0.995
Case 8 (2,-15)	0.817	0.814	0.808	0.799	0.789
Case 9 (0,+15)	1.168	1.172	1.177	1.185	1.194
Case 10(0,-15)	0.831	0.829	0.824	0.817	0.808

표 6. 갈수의 발생빈도

시나리오	2010	2020	1030	2050
(0,0) [회/년]	8.45	8.45	8.45	8.45
(4,+15) [회/년]	8.55	8.92	9.03	9.48
(4,+10) [회/년]	8.57	8.80	9.11	9.26
(4,0) [회/년]	8.66	8.82	9.51	10.04
(4,-10) [회/년]	8.59	9.17	9.58	10.14
(4,-15) [회/년]	8.53	9.41	9.66	10.33
(2,+15) [회/년]	8.43	8.23	8.46	8.57
(2,0) [회/년]	8.53	8.66	8.69	9.20
(2,-15) [회/년]	8.43	8.57	9.36	9.50
(0,+15) [회/년]	8.23	7.93	7.45	7.34
(0,-15) [회/년]	8.70	8.31	8.21	9.06

였다. 그러나 본 연구에서는 온난화가 발생되지 않을 때에 대한 상대적인 차이를 구하는 것이 주 목적이므로 홍수유량의 빈도분석법으로 가장 넓게 이용되는 Log Pearson Type III에 의한 확률 유량을 사용하여 상대적인 변화를 검토한다. 기온변화 및 강우량변화가 발생되지 않을 때의 확률유량과 각 기후변화 시나리오 별의 확률유량을 계산한 결과는 표 5와 같다.

기온상승만이 발생하는 시나리오(Case 3)의 경우 2050년의 시점에서 50년 확률유량은 1.7% 감소, 200년 확률유량은 1.9% 감소로 미소하게 나타났으며, Case 7의 경우에도 1%이내의 감소를 야기한다. 결국, 홍수량에 직접 관련이 되는 강우량의 변화가 없기 기 온변화만 생긴다면 증발산량의 증가로 인하여 저수유

량 이하에는 큰 영향을 줄 수 있으나 홍수량에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 반면, 강우량 변화에 대하여 가장 극단적인 Case 9(기온상승없이 강우량만 15% 증가하는 경우)에서 200년 확률유량의 경우 약 20%의 증가를 가져왔다. 또한 온난화와 함께 강우량도 함께 증가하는 Case 1의 경우 약 15~18%의 증가를 나타내고 있다.

4.3 갈수의 빈도 및 규모에 관한 검토

온난화가 진행됨에 따라 갈수 빈도 및 규모의 변화 양상도 변화 할 것이다. 여기서 말하는 갈수는 “유량 Q가 어느 기준유량 Q* 보다 작은 유량”으로 정의하고 “유량 Q가 어느 기준 유량 Q* 보다 작은 일련의 기

간"을 갈수기간으로 정의하여 이를 1회의 갈수라 하기로 한다.

기준유량 Q^* 의 값은 온난화가 발생되지 않을때의 저수유량 \overline{Q}_{275} 의 값을 이용하는 것으로 하여 $\overline{Q}_{275} = 5.42\text{m}^3/\text{sec}$ 의 값을 채택하였다. 따라서 여기서 의미하는 갈수는 저수유량보다 작은 일련의 유량이다. 표 6은 $\Delta T=0^\circ\text{C}$, $\Delta P=0\%$ 의 경우와 온난화 발생 시나리오에 대한 갈수의 발생빈도를 비교한 것이다. 현재 상황이 지속된다는 가정에서 연간 8.45회의 갈수가 발생하며 가장 극단적인 $\Delta T=4^\circ\text{C}$, $\Delta P=-15\%$ 인 경우에 있어서 최종년인 2050년에는 10.33회로 1.88회가 증가하는 것으로 나타났다.

그러나 갈수에 있어서 갈수 횟수보다는 갈수기간이 문제가 될 수 있으므로 갈수의 발생빈도가 반드시 갈수에 대한 심각성을 표현한다고는 말할 수 없다. 따라서 그림 7과 같은 갈수시의 총부족량(S_i), 최대부족량(Z_i), 갈수기간(L_i) 등에 대하여 분석하였다.

표 7은 각각의 시나리오별로 기준유량 Q^* 보다 작은 유량에 대한 총 부족량과 최대부족량을 산정한 결과를 나타낸 것이다. 온난화가 진행되지 않을 때에 비하여 온난화가 진행되고 강우량의 변화가 발생되지 않는 $\Delta T=4^\circ\text{C}$, $\Delta P=0\%$ 인 경우 2050년 기준으로 총부족량이 37% 증가하는 것으로 나타났다. 최대부족량은 기후변화와 강우량의 변화에 대하여 민감하게 반응하지

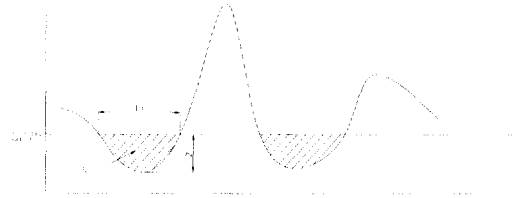


그림 7. 갈수에 관한 각 지표의 정의

않으나 총부족량은 크게 변화함을 알 수 있다. 강우량의 변화 없이 기온이 2°C 상승하는 (Case 7) 경우 총부족량은 16% 증가하며 이는 기온변화 없이 강우량이 15% 감소하는 (Case 10) 효과를 초래한다.

표 8은 갈수의 지속기간을 산정한 결과로서 온난화가 지속되지 않을 때 총 갈수일수는 86.5일이며, 평균 지속일수는 10.2일이다. 그러나 온난화가 지속되고 강우량 변화가 발생되지 않는 $\Delta T=4^\circ\text{C}$, $\Delta P=0\%$ 인 경우 2050년 기준으로 총 갈수일수는 114.18일로 증가하고, 평균 지속일수도 11.6일로 길어지는 것으로 분석되었다. 또한, 기온이 2°C 상승한다하더라도 15%의 강우량 증가가 발생하면 총 갈수일은 감소한다.

5. 결론

지구온난화에는 수많은 불확실성이 내포되어 있다.

표 7. 시나리오별 총부족량과 최대부족량의 비교

	2010		2020		2030		2050	
	총부족량	최대부족량	총부족량	최대부족량	총부족량	최대부족량	총부족량	최대부족량
(0,0) [m^3]	481,013.6	5,068.2	481,013.6	5,068.2	481,013.6	5,068.2	481,013.6	5,068.2
(4,+15)	1.01	1.02	1.06	1.01	1.10	0.99	1.19	0.94
(4,+10)	1.02	1.02	1.08	1.02	1.14	0.98	1.25	0.94
(4,0)	1.05	1.02	1.13	1.00	1.19	0.98	1.37	0.98
(4,-10)	1.07	1.03	1.17	1.00	1.28	0.98	1.49	1.03
(4,-15)	1.08	1.03	1.19	1.00	1.33	0.98	1.58	1.02
(2,+15)	0.94	1.03	0.99	1.01	1.00	1.00	1.01	0.98
(2,0)	1.01	1.03	1.05	1.03	1.09	1.02	1.16	0.99
(2,-15)	1.05	1.03	1.19	1.03	1.19	1.01	1.38	0.99
(0,+15)	0.97	1.01	0.93	1.03	0.89	1.03	0.84	1.05
(0,-15)	1.03	0.99	1.04	1.04	1.08	1.05	1.16	1.04

표 8. 시나리오별 갈수일수의 비교

	2010		2020		2030		2050	
	총갈수일	평균갈수일	총갈수일	평균갈수일	총갈수일	평균갈수일	총갈수일	평균갈수일
(0,0) [일수/년]	86.5	10.2	86.5	10.2	1.00	10.2	86.5	10.2
(4,+15)	1.00	0.99	1.04	0.99	1.08	1.01	1.16	1.04
(4,+10)	1.01	1.00	1.06	1.02	1.12	1.04	1.22	1.02
(4,0)	1.05	1.03	1.11	1.06	1.18	1.05	1.32	1.14
(4,-10)	1.06	1.05	1.17	1.08	1.25	1.11	1.42	1.22
(4,-15)	1.07	1.07	1.18	1.06	1.30	1.14	1.51	1.32
(2,+15)	0.99	1.00	0.99	1.01	0.99	1.00	0.99	0.98
(2,0)	1.00	1.00	1.05	1.03	1.08	1.05	1.16	1.06
(2,-15)	1.05	1.05	1.12	1.11	1.18	1.07	1.35	1.19
(0,+15)	0.97	1.00	0.93	0.99	0.90	1.02	0.86	0.99
(0,-15)	1.03	1.00	1.05	1.07	1.08	1.12	1.17	1.09

예를들어 온난화가 진행되면 호우는 더욱 시간적으로 집중된다고 알려져 있으며, 태풍·장마 등 우리나라의 물순환에 큰 영향을 주는 여러 현상과 이들을 지배하는 기상 및 수문인자가 온난화에 의해 어떻게 변화하게 될지도 현재 이해할 수 없는 점들이다. 이와같은 불확성이 내재되어 있는 상황에서 장래의 예측을 수행한다는 것은 해석자 자신의 주관적 해석이 되기 쉬우므로 이러한 의미에서 실측자료에 근거한 객관적으로 이해할 수 있는 방법이 요구된다.

이러한 관점에서 안동댐 유역을 대상으로 수자원에 미치는 온난화의 영향을 정량적으로 파악하고자 하는 연구를 수행하였다. 지구 온난화가 지속되어 2050년까지 강우량의 변화없이 4°C의 기온이 상승한다면 풍수량과 평수량은 약 17% 감소를 가져오나 저수량이하는 최대 30%의 감소가 예상된다. 또한 온난화의 지속과 함께 강우량이 증가하면, 홍수시의 유량은 증가하고 저수량 이하의 유량은 감소하여 치수 뿐만 아니라 이수 측면에서도 문제가 야기될 수 있다. 기온 상승과 함께 증발산량의 증가는 전체적인 수자원부존량에 크게 영향을 주며 이에 대한 갈수대책이 강구되어야 할 것이다.

본 연구에서는 현재 상정할 수 있는 온난화 시나리오에 기초하여 간단하고 명확한 가정 및 모형구성을 이용하였다. 여기서 제시하는 방법은 유출모형과 어느 정도의 장기간에 걸친 수문자료가 존재하는 유역이라

면 비교적 용이하게 적용할 수 있다. 보다 다양한 유역에 대하여 적용한다면 우리나라의 하천유역에 대한 수문응답변화의 특징을 파악하고 장래 수자원 계획의 방향을 제시하는데 유용하리라 생각된다.

참 고 문 헌

서규우 (1998). "지구온난화에 따른 수문환경의 변화". 한국수자원학회지, 제31권, 제4호, pp. 103~106.

오재호, 홍성길 (1995). "대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화". 한국수자원학회지, 제28권, 제3호, pp. 143~157.

윤용남, 유철상, 이재수, 안재현 (1999). "지구온난화에 따른 한반도 홍수 및 가뭄의 발생빈도 예측". 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 141~146.

윤용남, 이재수, 유철상, 안재현 (1999). "지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구". 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 165~170.

한국과학기술연구원 (1993). 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움. 기상청

한국과학기술연구원 (1994). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구. 과학기술처

한국수자원공사 (1997). '97 안동댐 유량측정 보고서

한국수자원공사 (1998). '98 안동댐 유량측정 보고서

- 한국수자원공사 (1999). '99 안동댐 유량측정 보고서
- 菅原正巳 (1972). 流出解析法. 共立出版
- 菅原正巳 (1979). 續, 流出解析法. 共立出版
- 榎根 勇 (1988). 水と氣象. 朝倉書店
- 角屋 陸, 永井明博 (1980). “流出解析手法-タンク
モデルとSP法による最適同定”. 日本農業土木學
會誌, Vol. 48, pp. 51~59
- 永井明博, 角屋 陸 (1979). “流出モデルの最適化
手法”. 京都大學防災研究所年報, 22, B-2, pp.
249~261.
- Hamon, W.R. (1961). “Estimating potential
evapotranspiration”. *Proc. Am Soc. Civil
Eng., Journal of the Hydraulic Division*, 87,
pp.107~120.
- IPCC, WMO/UNEP (1990). Climate Change
-The IPCC Scientific Assessment.
- Nigel Arnell (1996). *Global Warming, River
Flows and Water Resources*. Wiley.
- Powell, M.J.D. (1964). “An efficient method for
finding the minimum of several variables
without calculating derivatives”. *Computer
Journal*, Vol. 7, pp. 155~162
- Takara, K., Kojiri, T., Ikebuchi, S. and
Takasao, T. (1991). “A simulation study on
catchment response change due to global
warming”. *Environmental Hydraulics*, Lee
& Cheung(eds.), Balkema, pp. 1451~1456.
- (논문번호:00-044/접수:2000.07.03/심사완료:2000.09.16)