

## 기후변화에 따른 유역의 물수지 변화

양해근\*

### Water Balance Change of Watershed by Climate Change

Heakun Yang\*

**요약** : 본 연구에서는 기후변화에 따른 수문요소의 변동을 파악하기 위해 섬진강댐과 소양강댐 유역의 물순환 과정에 미치는 영향을 분석·평가하였다. 그 결과를 정리하자면 다음과 같다. 먼저 지난 30년간 기온과 강수량은 점차 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으나 증발산량은 지역에 따라 상이하게 나타나고 있으며 연평균 기온상승과 연증발산량의 증가가 정의 관계에 있다고 볼 수 없었다. Penman-FAO24법에 기초한 기후학적 물수지방법과 실측값은 서로 유의한 것으로 밝혀져 국내 물수지 연구에 사용가능한 것으로 사료된다. 한편 연강수량 증대에 따라 연유출량의 증가는 인정되나 연유출률에 대한 변동은 실측값과 계산값 간의 변동이 상이하게 나타나고 있어 기후변화의 영향이 유역의 유출특성에 크게 영향을 미치고 있다고 단정하기 어렵다. 기후변화에 의한 수자원관리와 재난관리에 큰 어려움이 예상되고 있다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 이에 대한 적절한 대응방안을 강구하기 위해서는 유역의 기후학적 조건과 수문학적 변동성에 대한 깊은 이해가 필요하며 보다 조밀한 수문관측망의 구축과 신뢰도 높은 자료의 축적이 전제되어야 할 것이다.

**주요어** : 기후변화, 기후요소, 유출고, 유출률, 물수지

**Abstract** : This study is intended to analyze and evaluate the effects of Seomjingang Dam and Soyanggang Dam Catchment on water circulation in order to examine water balance change of watershed by climate change. Obviously, air temperature and precipitation showed a gradually increasing trend for the past 30 years; evapotranspiration vary in areas and increasing annual average air temperature is not always proportional to increasing evapotranspiration. Based on Penman-FAO24, climatic water balance methods and measured values are shown to be significantly related with each other and to be available in Korea. It is certainly recognized that increasing annual rainfall volume leads to increasing annual runoff depth; for fluctuation in annual runoff rates, there are some difference in changes in measured values and calculated values. It is presumably early to determine that climate changes has a significant effect on runoff characteristic at dam catchment. It is widely known that climate changes are expected to cause many difficulties in water resources and disaster management. To take appropriate measures, deeper understanding is necessary for climatological conditions and variability of hydrology and to have more careful prospection and to accumulate highly reliable knowledge would be prerequisites for hydrometric network.

**Key Words** : climate change, climatic element, runoff depth, runoff rate, water balance

\* 건국대학교 지리학과 강의를수(Lecturer, Department of Geography, Konkuk University), hydroyang@hotmail.com

## 1. 머리말

현재 진행되고 있는 지구 온난화 현상은 미래의 기후현상과 물순환 과정에 큰 변화를 불러일으킬 것으로 예견되고 있다(서용원 등, 2000; Ludwing *et al.*, 2004). 특히 물순환 과정의 변화는 곧 강수량, 증발산량, 지표수 유출, 토양 함수량 등이 달라지는 것을 의미하는 것으로 미래의 수자원의 변동뿐만 아니라 홍수와 가뭄 또한 극심해질 것으로 보고되고 있다(Change *et al.*, 1992; Rind, 1993; Trenberth, 1998, 1999; 안재현 등, 2001; 김병식 등, 2005; Yang, 2006).

유라시아대륙 동북부 반도에 위치한 우리나라는 지리적 특성 때문에 매년 여름철이면 집중호우와 태풍 등으로 귀중한 인명과 재산상의 피해가 발생하고 있으며, 최근 기상이변으로 대규모의 홍수와 가뭄 그리고 이상고온 및 냉해의 발생이 잦아지고 있는 추세이다(장기환, 1999). 이러한 현상은 우리나라뿐만 아니라 전 세계 곳곳에서 발생하고 있으며, 이는 지구온난화로 인한 기후변화에 기인한 것으로 보는 견해가 많으나 아직 역학적-물리적 이론에 근거한 설명은 충분하지 않다(김승, 1999; Yang, 2006).

수자원의 운영·관리 및 계획은 수문요소들의 정상시계열(Stationary time series)이라는 가정 하에서 설계, 운영되고 있어(Schwarz, 1977; Lettenmaier and Burges, 1978) 급격한 기후변화가 예상될 경우 효과적인 수자원활용을 위해서는 모든 수자원관리시스템의 재고찰이 요구된다(김영오, 1999). 이와 관련하여 미국을 비롯한 EU, 일본 등지에서는 매년 많은 연구성과가 발표되고 있으며 국내에서도 서용원 등(2000)과 안재현 등(2001), 김병식 등(2004) 등의 연구성과가 있다. 그러나 2CO<sub>2</sub>상태의 기후변화를 가정한 서용원 등(2000)과 안재현 등(2001)에서는 풍수기에 유출률 증가로 인한 심각한 홍수가 초래될 가능성이 클 것으로 예측한 반면, 용담댐을 대상으로 한 김병식 등(2004)의 연구에서는 오히려 여름철 유출량이 감소하여 연평균 유출량이 감소될 거라는 상반된 예측하고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 기후변화에 따른 물순환 과정의 변동이 예상되고 있지만 유역의 물순환 기구는 상이한 수문지형·지질적 차이 그리고 복잡하고 다양한 요인

들에 의해 좌우되므로 물순환 과정에 대한 정확한 파악을 더욱 어렵게 하고 있다(김병식 등, 2005).

한편 국토면적이 협소하고 인구밀도가 높은 우리나라는 다른 나라에 비해 지구 온난화에 따른 작은 기후변동에도 심각한 수자원 문제가 발생할 가능성이 크다고 지적되고 있으나(김병식 등, 2005), 김도정(1970), 박병익(1996), 정현숙 등(1999), Choi(2002a, 2002b), Choi *et al.*(2003), 이승호·권원태(2004), 김은희(2005) 등을 중심으로 기후요소 변동에 관한 연구만 활발히 진행되고 있을 뿐 기후 요소와 수문량 변동에 대한 상호관계 연구는 미진한 실정이다.

기후변동에 대한 수문학적 모델의 구축과 검증에 관한 고찰은 수리학자들을 중심으로 연구가 이루어지고 있기 때문에 본 연구에서는 수문지리학적 관점에서 기후변화 요인이 유역의 물수지 즉 유역의 유출률 변동에 영향을 미치고 있는지를 평가하기 위해 지형·지질, 식생, 인위적인 요인 등을 무시한 기후요소만으로 산출된 계산값 즉 최근 '수자원 계획의 최적화연구(건설교통부, 1997)'와 '기후변화영향평가모형 개발(전성우 등, 2004)' 등에 이용되었던 Penman-FAO24에 기초한 기후학적 물수지법에 의한 계산값과 유역의 실측자료를 비교·분석하였다. 유역의 물순환은 매우 다양한 수문요소가 복합적으로 결합된 것으로 그 특성을 파악하기 위해서는 신뢰성 있는 장기간의 관측자료가 전제되어야 하므로(樞根勇, 1969; 梁海根, 1996) 다목적댐 중 30년 이상의 장기간 관측자료가 존재하고 유황변화에 대한 인위적 개입이 적은 소양강댐과 섬진강댐 유역을 연구대상으로 하였다.

## 2. 연구지역의 개요

섬진강댐 수계는 섬진강 최상류부에 위치해 있으며, 전라북도 장수, 임실, 진안 등의 군 경계를 이루는 팔공산(EL. 1,151m)에서 발원하여 남서방향으로 유하하여 옥정호에 유입한다. 섬진강댐은 1965년에 준공된 우리나라 최초의 다목적댐으로서 유역면적은 763km<sup>2</sup>, 하천의 총 유로연장길이는 82.4km이고 댐 관리를 위해 댐 주변에 8개의 우량관측지점과 3개의 수위관측지

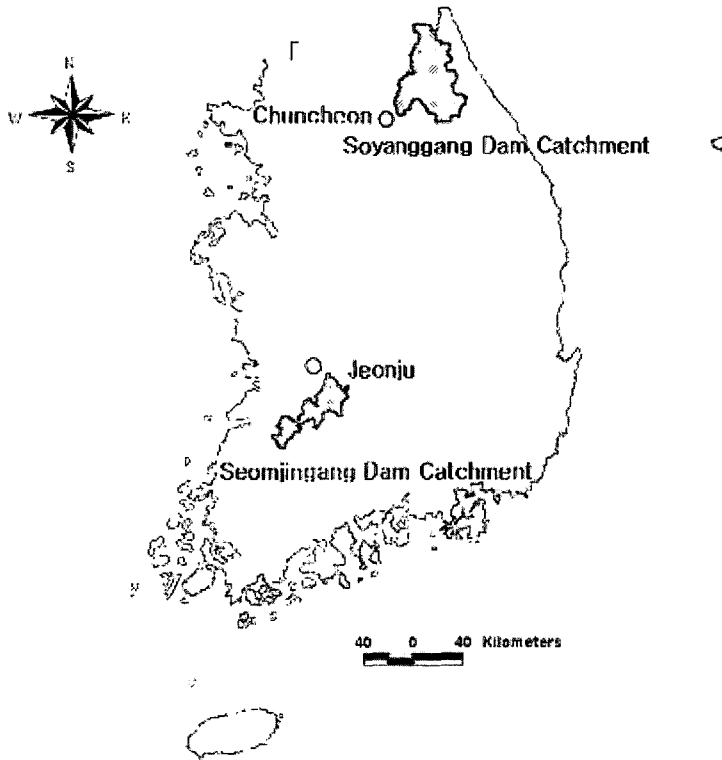


Figure 1. Location map of the study area

점이 설치되어 있다. 그리고 소양강은 한강의 제2지류이며 강원도 홍천군 만월봉(EL. 1,281m)에서 발원하는 북한강의 제1지류이다. 소양강댐 유역면적은 2,703km<sup>2</sup>, 총 유로연장 166.2km로서 수도권의 안정적인 물공급을 위해 1973년에 완공된 다목적 댐이다. 소양강댐을 효율적으로 관리하기 위한 수문관측지점은 5개의 수위관측지점과 12개의 우량관측지점이 운영 중이다(Figure 1). 이처럼 대규모 다목적 댐주변에는 비교적 조밀한 수문관측망이 설치되어 있어 다른 지역에 비해 신뢰성 있는 수문자료를 확보할 수 있는 장점이

있다.

지난 30년간(1975-2005)의 강우자료에 의하면 섬진강댐유역의 경우 우리나라 연평균강우량과 비슷한 1,313mm를 기록하고 있으나, 소양강댐유역은 약 1,200mm로 다소 적은 편이다. 그리고 섬진강댐과 소양강댐유역의 연평균 유입량은 각각 17.3cms, 55.5cms로 알려져 있다(Table 1).

Table 1. Seomjingang Dam and Soyanggang Dam specification

Dam	Basin area(km <sup>2</sup> )	River length(km)	Annual mean inflow (cms)	Total reservoir storage (×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Effective capacity of reservoir (×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Seomjingang	763	82.4	17.3	466	370
Soyanggang	2,703	166.2	55.5	2,900	1,900

Source: <http://www.wamis.go.kr/main.aspx>

### 3. 수문기상자료와 분석

기후변화란 어떤 방향으로 변화되는 경향을 뜻한 것으로 일정한 시간동안에 어떤 방향으로 진행되는 변화 혹은 변동에서 관찰된 시간의 연속은 중요한 의미를 갖는다(김도정, 1970). 기후변화를 고찰하는데 있어서 중요지표로 기온, 강수량, 일조량, 증발량 등의 경년변화가 주로 이용되고 있으며(강만석, 1984), 유역의 물순환 혹은 물수지의 실체를 파악하기 위해서는 유역의 물수지를 고려한 장기간의 유출을 정량화하는 것이 필요하다(梁海根, 1996).

우리나라 다목적댐 관리를 위한 수문관측은 대부분 강우량과 수위-유량만을 측정하고 있으며 그 자료는 매년 건설교통부 “한국수문조사연보(우량, 수위, 유량)”를 통해 발표되고 있다. 한편 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS; <http://www.wamis.go.kr/main.aspx>)에서는 이들 자료를 시·일·월 단위로 제공하고 있다. 본 연구에서는 WAMIS에서 제공하는 유역의 월 평균강수량과 월유입량을 이용하였으며, 증발산량에 영향을 미치는 기후요소는 인근 기상관측지점인 춘천 기상관측소와 전주기상관측소의 지난 30년(1975-2005)간의 기온, 평균풍속, 상대습도, 일조시간, 운량을 이용하여 증발산량의 경년변화와 물수지의 중요 요소인 유출률의 변동을 분석하였다.

댐 유입량은 유역 내 수위관측지점의 자료를 기초로 저수지내 수량수지 계산에 의해 산출된 것으로 본고에서는 이를 저수지 수면적을 제외한 유역으로부터 유입되는 총 유출량으로 간주하였다. 유역의 증발산량은 증발산을 일으키는 에너지량에 의해서 결정되기 때문에 다른 기후요소와 달리 연변화가 크지 않다(樵根勇·竹内浩, 1971; 梁海根, 1996). 일반적으로 널리 이용되고 있는 증발산 산정방법으로 Thornthwaite(1948), Penman(1948, 1956), Blaney-Cridde(1950) 등의 방법이 있다. Thornthwaite의 방법은 김연옥(1963, 1970)과 송태용(1966), 이현영(1975), 강만석(1984) 등에 의해 그 실효성에 관하여 연구되어 왔다. Thornthwaite 법은 기온이 낮은 겨울철 유출량이 실제보다 과대평가 되고, 기온이 높은 여름철에는 실제보다 적게 평가되는 문제점이 있으며 토양수분변화량에 근거한

Thornthwaite-Mather(1957) 물수지법은 실제 유출특성을 반영하지 못한다는 지적을 받고 있다(樵根勇, 1969; 新井正, 1976). 한편 關口武·吉野正敏(1953)와 梁海根(1996)에 의하면, Thornthwaite-Mather의 물수지법은 적설기간이 짧고 신뢰성 있는 기상자료의 수집이 가능한 지역에서 장기간의 관측자료를 기초로 한 평균적 물수지를 추정하는데 그 유용성이 있다는 견해가 있다(양해근·김종일, 2004). 그러나 본 연구대상 지역은 비교적 신적설량이 많으며 최한월(1월)의 평균 기온이 영하를 나타내고 있어 적설 후 융설수 출현에 걸리는 지체 때문에 Thornthwaite 법에 기초한 Thornthwaite-Mather의 물수지법의 사용은 곤란하다고 판단된다. 그리고 1970년대 농업용수산정에 널리 적용되었던 Blaney-Cridde방법은 미국 건조지역에서 개발된 발작물에 대한 증발산량산정에 이용되었던 것으로 우리나라에 적용하는데 다소 많은 문제가 제기되고 있다(고희원 등, 1989). 그러나 IHP(International Hydrological Programme)사업 일환으로 설계된 보정 천유역의 실측값과의 비교연구(안상진·김종변, 1988)에서 Penman방법의 실효성이 인정되었으며 그 후 증발산량에 대한 많은 연구에서도 Penman식이 우리나라 지리적 여건에 적합한 방법으로 간주되고 있다고(고희원 등, 1989).

따라서 본 연구에서는 최근 우리나라 물수지 분석에 있어서 합리적인 방법으로 인식되고 있는 Penman방법에 기초한 Penman-FAO24를 사용하였다. Penman-FAO24방법은 1990년 FOA(Food and Agriculture Organization of the United Nations)에서 제시한 잠재 증발산량(Potential evapotranspiration) 추정을 포함한 토양 수분 변화에 기초한 물수지방법이다(Saua *et al.*, 2004). Penman-FAO24 공식은 다음과 같다.

$$ET_0 = W \cdot Rn + (1 - W) \cdot F_{u0} \cdot (e_a - e_d)$$

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$$

$$\Delta = \frac{e_a}{t} \times \left( \frac{6790.4985}{t} - 5.02808 \right)$$

$$\gamma = 0.0006595 \times (1013 - 0.1152 \times b + 5.44 \times 10^{-6} \times b^2)$$

$$Rn = Rns - Rb$$

$$Rns=(1-\alpha) \times Rs$$

$$Rs=(a+b \times \frac{n}{N}) \times Ra$$

$$Rb=(a_1 \times \frac{n}{N} + b_1) \times Rb_0$$

$$Rb_0=(a_2 + b_2 \times \sqrt{e_b}) \times \sigma \times T^4 \div L$$

$$f_{w0}=Cw+(Aw+Bw \times U_2)$$

$$e_a=33.8639 \times ((0.00738t+0.8072)^8 - 0.000019 \times (1.8t+48)+0.001316)$$

$$e_d=e_a \times R_b$$

∴  $ET_0$ : 잠재적증발산량(mm/day),  $W$ : 온도상수( 온도에 관한 가중치),  $Rn$ : 순일사량(mm/day),  $f_{w0}$ : 풍속에 관한 변수,  $e_a$ : 평균기온에서의 포화증기압(mmHg),  $e_d$ : 대기에서의 실제평균 증기압(mmHg),  $\gamma$ : 건구의 상수,  $b$ : 해발고도(m),  $t$ : 온도,  $T$ : 절대온도,  $Rs$ : 일사량(mm/day),  $\alpha$ : albedo,  $Rb_0$ : 순장파복사량(mm/day),  $n$ : 일조시간,  $N$ : 가조시간,  $Ra$ : 대기밖의 일사량(mm/day),  $L$ : 기화잠열(=596-0.51t),  $U_2$ : 지상 2m상공의 풍속,  $a, a_1, a_2, b, b_1, b_2$ : 각각 지역상수

Penman-FAO24 식에 대한 자세한 도입과정은 건설교통부(1997) 혹은 Sauer *et al.*(2004)을 참고하기 바란다.

## 4. 기후요소의 경년변화

### 1) 기온

산업혁명 이후 인위적으로 배출된 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등의 온실가스에 의한 지표면의 온도 상승은 전 지구 규모적 경향으로 특히 북반구의 고위도 지역에서 현저하게 나타나고 있다(김도정, 1970; Houghton *et al.*, 2001). 우리나라의 연 평균기온은 지난 100년간 약 1.8℃정도 상승하였으며(박병익, 1996), 도시화 영향을 제거한다 하더라도 연평균 기온 상승률은 약 0.5℃ 이상 상승했던 것으로 보고되고 있다(박병익, 1996; Choi *et al.*, 2003). 이는 세계 평균기온과 비교할 때 약 2~3배 빠른 것이다(신경섭, 2003).

Figure 2는 삼진강댐과 소양강댐 유역부근에 위치한 전주기상관측소와 춘천기상관측소의 지난 30년간(1975-2005)의 연평균기온의 경년변화이다. 춘천지점이 전주지점에 비해 그 편차가 크게 나타나고 있으나, 두 지점 모두 연평균 기온의 상승이 뚜렷하게 나타나고 있다. 지난 30년 동안에 전주지점의 평균기온 변화는 Air Temp.(°C)=0.0407x+12.08의 관계식으로 나타낼 수 있으며, 춘천지점의 경우도 Air Temp.(°C)=0.0417x+11.099 즉 평균적으로 매년 0.04℃이상 상승하여 결과적으로 1975년 이후 양 지점 모두 1.2℃이

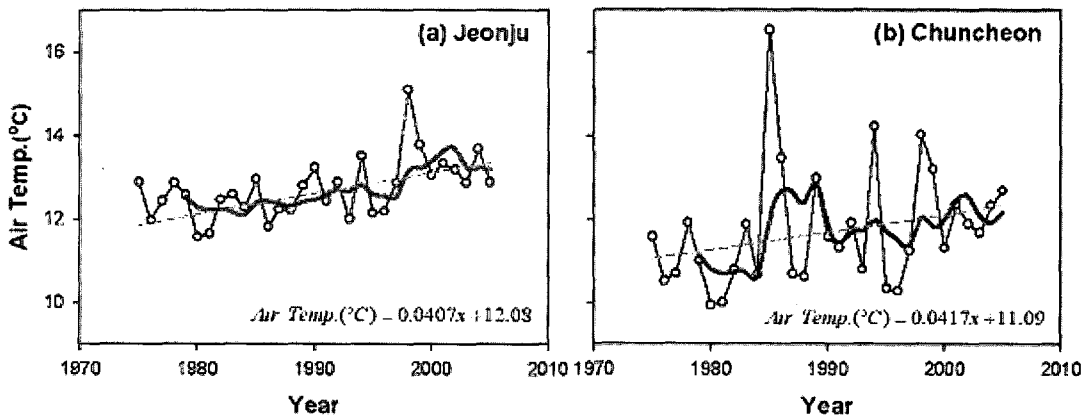


Figure 2. The time series of annual mean air temperature at Jeonju and Chuncheon weather station. The circle line shows annual mean values; the thick line shows a 5-year running mean; the dotted line is regression line.

상 상승하였다고 간주할 수 있다. 한편 김도정(1970)과 신경섭(2003)에 의하면 여름철에 비해 겨울철에 기온 변화 폭이 크게 나타난 것으로 보고되어 있어 겨울철 적설량과 융설 시기에 변화를 초래할 가능성이 있으며 이는 유역의 유출기구에도 영향을 미칠 것으로 생각할 수 있다.

## 2) 강수량

강수는 우리 일상생활과 매우 밀접하게 관련된 기상 요소 중의 하나로 기온과는 다르게 시·공간의 편차가 크며(허창희·강인식, 1988; 김은희 등, 2005), 지형적인 영향이 크게 작용하므로 산지가 전 국토의 2/3를 차지하는 우리나라의 경우 시·공간적인 변동을 파악하는 것이 용이하지 않다(최영은·권원태, 2005).

1900년 이후 우리나라의 강수량은 연편차가 심하게 나타나지만 평균적으로 약간씩 증가하고 있는 추세를 보이고 있다(Lim and Jung, 1992; Chung and Yoon, 1999). 그러한 현상은 Figure 3에서도 볼 수 있으며 지난 30년간 섬진강댐 유역과 소양강댐 유역의 연강수량의 경년변화에 있어서도 전체적으로 증가하고 있는 경향이 뚜렷하다. 특히 열대이동성 저기압의 영향을 상대적으로 많이 받는 섬진강댐 유역에서 연강수량의 편차가 더 크게 나타나고 있다. 양 유역의 연강수량의 경

년변화는 각각  $Precipitation(mm/y)=13.386x+1098.9$ ,  $Precipitation(mm/y)=10.223x+1040$ 의 관계식으로 나타낼 수 있으며, 매년 10mm이상 증가하고 있는 것으로 간주할 수 있다.

한편 Choi(2002a, 2002b)과 신경섭(2003), 김은희 등(2005) 등에 의하면 연 강우일수는 현저하게 감소하는 경향을 나타내는 반면 강우강도의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있는 것으로 보고되고 있다. 강우 특성 중 강우강도는 수자원 관리와 홍수 조절 등 사회·경제적으로 매우 중요한 요소이다.

## 3) 증발산량과 그 외 기후요소

증발산은 지표면에 내린 강수의 일부가 대기 중으로 되돌아가는 물순환 과정의 한 요소로써 강수량 손실의 상당부분을 차지한다(Chow *et al.*, 1988). 차은정(2001)과 Trenberth(99)에 의하면, 지표면의 온도 증가는 지표면의 수분 증발을 강화시켜 지표면의 가용수 자원에 영향을 미칠 뿐만 아니라 대기 수분함량의 증대는 지역적으로 강우빈도나 강수량 변동에 영향을 미칠 수 있다.

증발산량은 다양한 기후요소 즉 일사량, 바람, 지표면의 식생분포, 토양상태, 대기 온도, 습도 등과 상관되어 발생하기 때문에 실제 증발산 측정이 용이하지

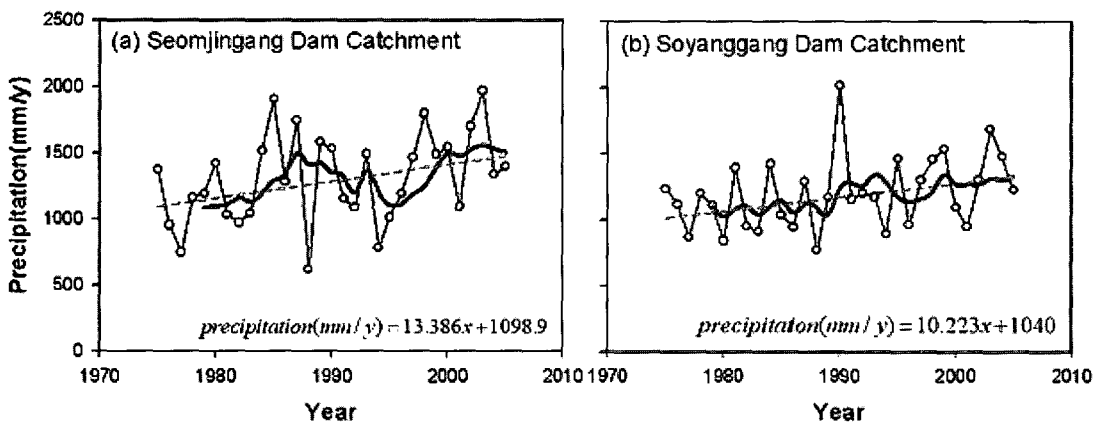


Figure 3. The time series of annual precipitation in Seomjingang Dam and Soyanggang Dam Catchment. The circle line shows annual values; the thick line shows a 5-year running mean; the dotted line is regression line.

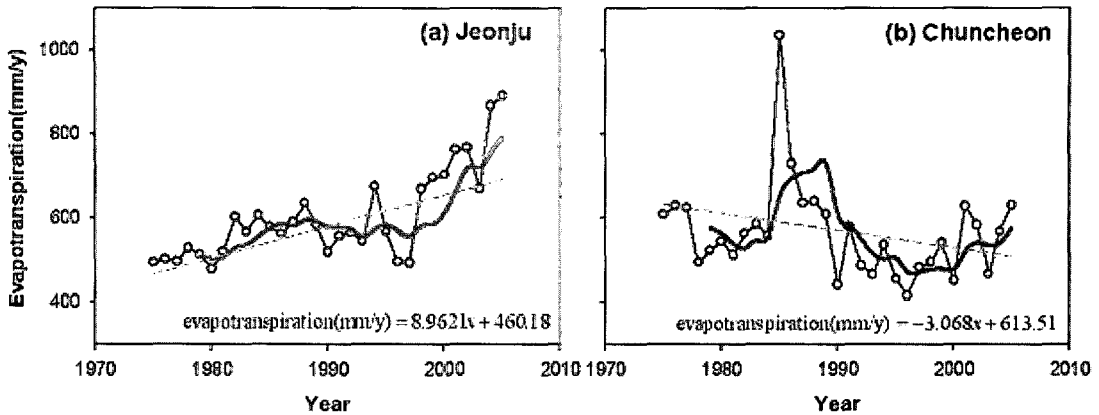


Figure 4. The time series of annual evapotranspiration with Penman-FAO24 method at Jonju and Chuncheon weather station. The circle line shows annual values; the thick line shows a 5-year running mean; the dotted line is regression line.

않다. 그런 이유로 여러 가지의 이론적 경험적 증발산량 추정방법들이 제안되고 있으나(新井正, 1979; 이용호 등, 2000), 본고에서는 우리나라에 적합한 것으로 알려져 있는 Penman(1948)방법에 기초한 Penman-FAO24를 사용하였다. 그러나 Penman-FAO24는 식량 생산에 필요한 가용 농업용수를 산정하기 위해 FOA에 의해서 수정·보완된 것으로 특정작물 계수가 개발된 농경지에서는 높은 신뢰도를 갖을 수 있으나, 식생분포가 다양한 유역단위의 증발산량 산정에 Penman-FAO24를 그대로 적용할 경우 과대평가되는 결과를 얻을 수 있다. 실제 우리나라에서 제시되고 있는 작물계수는 주로 논을 대상으로 한 것이기 때문에 900mm/y를 훨씬 초과하는 증발산량이 출현하는 등 Penman(1948)의 자유수면 잠재적 증발량(potential evaporation)과 큰 차이가 없어 이를 보정해 줄 필요가 있다(류상범·김영아, 2000). 따라서 본고에서는 위도가 비슷한 일본지역의 평균보정계수  $f=0.65-0.7$ (新井正, 1976)를 적용하였으며, 이때 실제 수문관측 값을 기초로 산출되는  $P$ (강수량)- $R$ (유출량)의 관계 값과 유사한 값이 유도되는 0.65를 사용하였다. 그 결과는 Figure 4와 같다. 전주지점의 경우 증발산량의 상승이 뚜렷하게 나타나고 있으나 춘천지점의 경우 연구대상 기간 중 연평균기온은 11.7°C를 크게 상회한 16.5°C(1985)와 13.5°C(1986)의 영향으로 이동평균에 대한 회

귀식의 기울기가 음의 값을 나타낸다. 이례값(outliers)으로 판단되는 이들을 제외할 경우에도  $evapotranspiration(mm/y)=-3.7658x+594.24$ 를 나타내는 음의 기울기를 보인다.

연구지역의 증발산량 산정에 영향을 미치는 주요 기후요소 즉 운량과 일조시간, 상대습도, 평균풍속의 경년변화를 보면 양 지역에서 평균풍속을 제외한 운량과 일조시간, 상대습도는 서로 유사한 변동패턴을 보이고 있다. 그러나 평균풍속의 경우 전주지역에서는 뚜렷하게 상승하는 경향을 보인 반면에 춘천지역에서는 감소하는 경향이 현저히 나타나고 있어 경년변화에 다소 영향을 미친 것으로 사료된다(Figure 5). 두 지점의 평균풍속의 변동은 상이한 지형요소가 크게 작용한 것으로 판단되며, 지표면의 기온상승은 접지기후(climate near the ground)에 가장 영향을 미치게 된다. 특히 분지지형인 춘천의 경우 지표면의 기온상승은 상대적으로 상승기류의 발생이 용이하게 되므로 풍속의 감속을 유발할 가능성도 배제할 수 없다.

Figure 6은 증발산량에 영향을 미치는 운량과 일조시간, 상대습도, 평균풍속 간의 상호관계를 나타낸 것이다. 먼저 증발산량의 변동과 일조시간, 운량 간에는 서로 유의한 상호관계가 전혀 보이지 않으나 상대습도와 풍속과는 대체로 관계가 있는 것으로 보인다. 특히 전주지점에서 증발산량은 운량과 비교적 높은 음

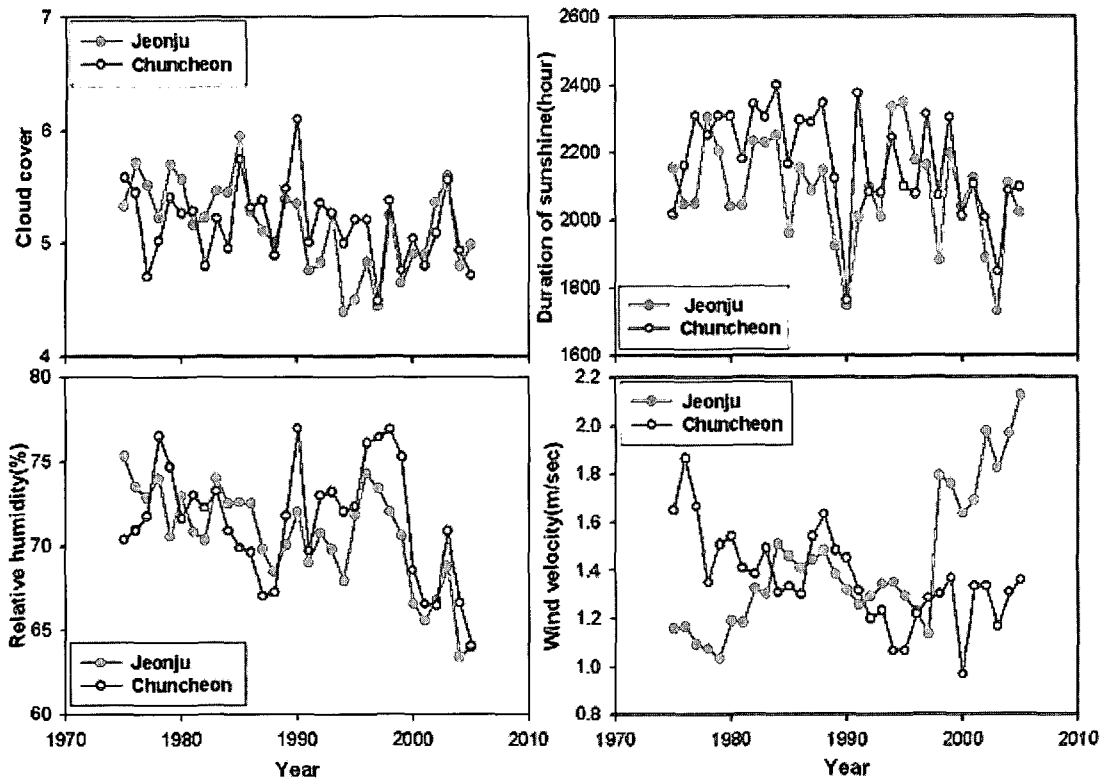


Figure 5. The time series of annual sunshine duration, cloud cover and relative humidity at Jeonju and Chuncheon weather station.

의 관계를 그리고 풍속과는 높은 정의 관계를 나타내고 있다. 기온과 증발산량간의 상관관계는 섬진강댐 유역에서 0.28( $r^2$ ), 소양강댐유역에서 0.26( $r^2$ )을 각각 나타냈다.

증발산량은 상기에서 기술한 바와 같이 기온, 일조 시간, 상대습도, 운량, 풍속, 지표면의 토양함수율, 식생 등과 관련되어 있어 Figure 5와 6만으로 그 영향을 파악하기에는 많은 문제가 있으며, 이에 관한 논점은 접지기후 분야의 중요한 연구과제가 되므로 본고에서 깊이 있는 논의는 피하고자 한다.

### 5. 유역의 물수지 변화

일반적으로 유역단위의 물수지는 다음과 같은 관계 식으로 나타낼 수 있다(梁海根, 1996).

$$P = E + R + G \pm \Delta S$$

∴  $P$ : 강수량,  $E$ : 증발산량,  $R$ : 유출량,  $G$ : 지하수 저유량 변화,  $\Delta S$ : 토양수분 변화

그러나 수년(water year)단위의 물수지를 고려할 때 유역 내의 토양수분과 지하수위 변화는 거의 0에 가깝기 때문에 무시할 수 있다(Kayane, 1968; 新井正, 2001). 따라서 상기의 식은

$$R = P - E, \quad \frac{R}{P} = 1 - \frac{E}{P}$$

로 정리할 수 있다. 따라서 관측 수문량 즉 강수량과 유출량의 관계( $E = P - R$ )에 따라 실제증발산량( $E$ )을 추정할 수 있다. 그리고 서로 규모가 다른 두 유역의 물수지를 비교하기 위하여 댐으로 유입하는 유출량을 유



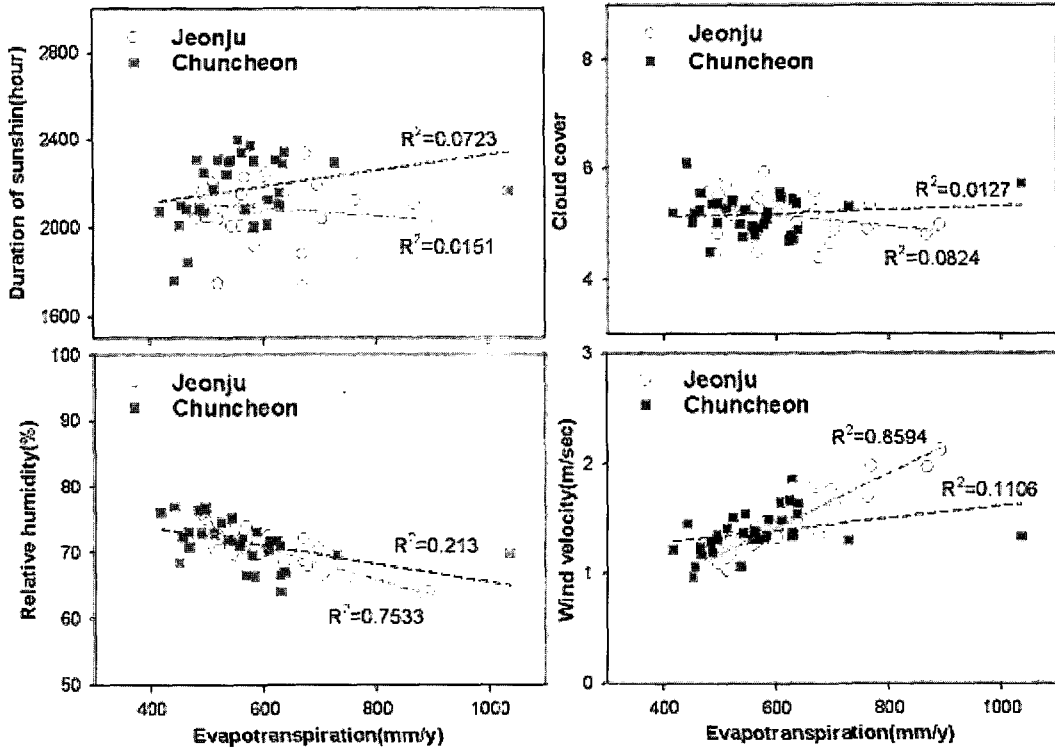


Figure 6. Correlation between evapotranspiration and climatic indices(sunshine duration, cloud cover, relative humidity) related to evapotranspiration at Jeonju and Chuncheon weather station.

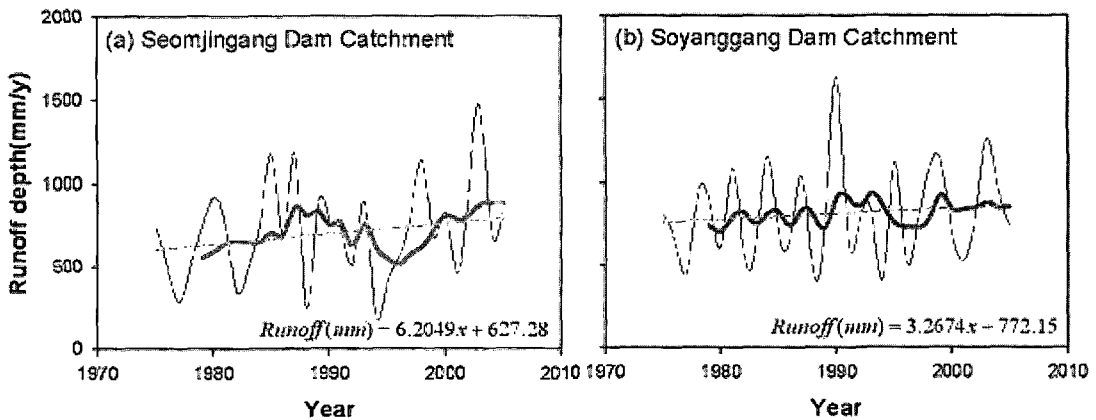


Figure 7. The time series of runoff depth in Seomjingang Dam and Soyanggang Dam Catchment. The thin line shows annual values; the thick line shows a 5-year running mean; the dotted line is regression line.

출고로 변환할 필요가 있다. Figure 7은 상기에 제시된 물수지 관계식을 이용하여 산출된 섬진강댐 유역과 소양강댐 유역의 연유출고의 경년변화를 나타낸 것이다. 두 유역 모두 연유출고가 증가하는 경향을 보이고 있

다. 이는 강수량의 경년변화와 매우 높은 상관성을 갖는 것으로 각각 0.93, 0.94의 상관계수( $r$ )를 나타낸다. Mohseni and Stefan(1998)은 강수량의 변화에 대한 유출량 분석연구에서 강수량이 20% 증가할 때 연평균

유출량은 35% 증가한다고 보고하고 있으며, 이는 기후변화에 의한 강수량의 변화가 총 유출량에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 연유출고의 증가경향은 섬진강댐 유역이 더 현저하며 각각  $Runoff(mm/y) = 6.2049x + 627.28$ ,  $Runoff(mm/y) = 3.2674x + 772.15$ 의 관계식으로 나타 낼 수 있다. 즉 섬진강댐 유역이 매년 3mm 더 증가하는 경향을 나타내지만 증발산량의 변동이 적고 평균기온이 낮은 소양강댐 유역이 섬진강댐 유역에 비해 실제 연유출고는 높게 나타나고 있다. 특히 지난 30년간 소양강댐 유역의 평균 유출률은 0.67

로서 신영규(2004)에서 제시된 대관령 부근 농경지 소유역의 유출률 0.62보다도 더 높은 것이다. 소양강댐 유역의 높은 유출은 지난 2006년 8월 집중호우시 대규모 산사태와 토석류, 하천범람을 일으킨 주요 요인으로 작용했을 것으로 사료된다. 섬진강 유역은 우리나라 평균 유출률에 가까운 0.53을 기록하였다.

댐 설계는 안정성을 고려하여 최대가능강수량을 기준으로 설치·운영되고 있다. 다목적댐의 홍수조절기능은 집중호우로부터 재산과 인명의 피해를 줄일 수 있으나 기상이변 현상으로 인한 게릴라성 호우의 집중

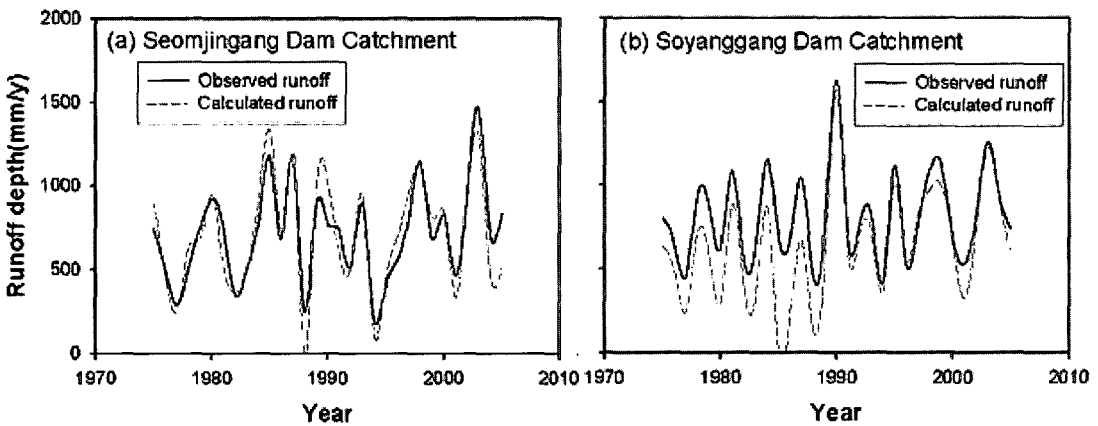


Figure 8. The observed and calculated runoff depth, 1975–2005.

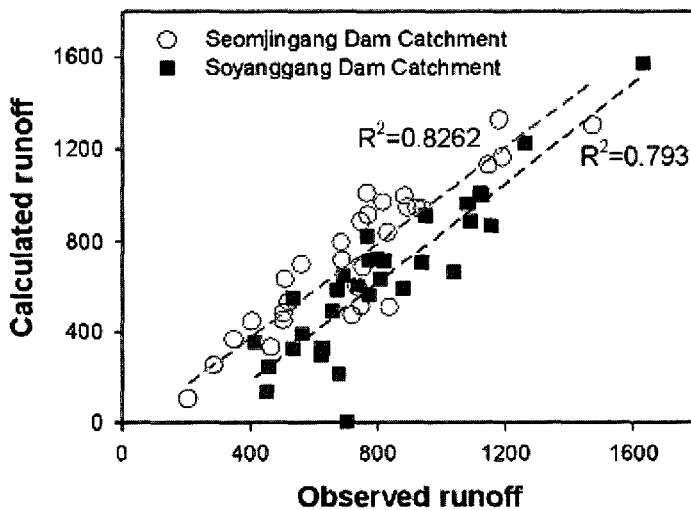


Figure 9. Correlation between observed runoff and calculated runoff. The dotted lines are regression line.

과 연강수량 증대, 강우 빈도와 강도의 변화 등과 같은 강우사상의 불확실성 증대에 대한 댐 운영의 효율성을 확보하는 것 또한 증대한 과제가 아닐 수 없다(백덕효, 2005).

Figure 8과 Figure 9는 댐 유역으로부터 유입되는 유출고와 Penman-FAO24법을 기초한 기후학적 물수지법에 의해 계산된 유출고간의 비교이다. 대체로 관측값과 계산값이 서로 유사한 유출특성을 나타내고 있으나, 1989년 이전 소양강댐 유역의 관측값에 비해 계산값이 적게 평가되고 있다. 이러한 현상은 수문관측값의 오류 혹은 관측망의 정비 내지는 기상관측자료의 문제 그리고 관측지점 선정 등에 기인한 것으로 생각된다. 그러나 Figure 8에 기술된 바와 같이 관측값과 계산값 간의 결정계수( $R^2$ )는 각각  $0.82(r=0.91)$ ,  $0.79(r=0.89)$ 로 높은 상호관계가 인정되며, Penman-FAO24법을 이용한 기후학적 물수지도 유용한 것으로 간주된다.

한편 소양강유역의 유출특성에 대해 백경록 등(2000)은 HEC-1모형과 Clark 단위도 유도방법에 의한 최적화기법으로 강우-유출간의 변동관계를 살펴보았으나 단기자료의 한계로 인하여 그 유의성을 밝히지 못했다. 향후 이러한 문제 등을 고려하여 소양강댐 유역의 유출특성에 대해 보다 상세히 고찰하고자 한다.

## 6. 고찰 및 토의

산업혁명 이후 온실가스 증가로 인한 기후변화는 미래의 물수지 혹은 물순환 과정이 과거와 다른 패턴으로 변화할 수 있다고 경고하고 있다(Trenberth, 1998, 1999; 안재현 등, 2000; Ludwig *et al.*, 2004; 백덕효, 2005). 기후변화로 인한 유역의 물수지 변동과 유출형태의 변형은 생활 및 공업용수의 수요에도 커다란 파급효과를 미칠 뿐만 아니라 심각한 홍수피해와 한해를 초래할 가능성이 커진다는 것을 의미한다.

특히 여러 기후요소 중 강수량과 기온은 높은 상관성을 가지고 있으며(정현숙 등, 1999), 이러한 현상은 앞서 기술한 Figure 2와 Figure 3의 경년변화에서도 확인할 수 있다. 즉 최근 30년간의 기상관측자료에 나타난

결과에서도 기온과 강수량 증가 경향이 거의 동일하게 나타나고 있으며 이들 상관관계( $r$ ) 역시 0.94(전주), 0.95(춘천)라는 대단히 높은 것이다. 적어도 두 지역의 기온과 강수량은 서서히 증가하고 있는 통계학적 추이를 나타내고 있다는 것이다.

일반적인 기온이 1℃ 상승하면 대기의 포화수증기압은 약 10% 증가하고, 기온상승은 식물과 토양의 증발산을 증가시켜 가능최대강수량이 10%이상 증가하는 것으로 예상할 수 있다(Trenberth, 1999; 백덕효, 2005). 유역의 증발산량은 증발에 필요한 이용 가능한 에너지량에 의해서 결정되고 유역내 토양수분 과부족에 의해서 가능증발산량에 대한 실제 증발산량의 비율이 결정된다(Thorntwaite and Mather, 1957; Kayane, 1968). 습윤지역인 우리나라에서는 토양수분 과부족이 거의 일어나지 않는다는 점에서 증발산량은 순방사량에 의해서 좌우된다고 볼 수 있으며 순방사량은 강수량에 비해 비교적 연변동이 크지 않는 것으로 알려져 있다(Kayane, 1968; 榎根勇·竹内浩, 1971). 본 연구결과 중 평균풍속의 증가와 상대습도의 감소가 뚜렷한 Figure 4(a)에서 증발산량은 미약하지만 증가하는 것으로 보이나 Figure 4(b)에 나타난 증발산량의 변동 중 이례값을 제거 할 경우 거의 변화가 없다는 점을 볼 때 지구온난화현상에 의한 기온상승만으로 증발산량에 영향을 미치고 있다고 단정하기 어려운 점이 있다. 여기에는 보다 다양한 기후요소와 접지면에서 일어나는 복잡한 기상현상 등이 관계하고 있어 그동안 간과되어 왔던 접지기후에 대한 깊은 고찰이 필요하리라 생각한다.

한편 강수량증대에 따른 연유출고의 증대가 본 연구 지역에서도 뚜렷하게 나타나고 있어 실제 유역별 수문량에 대한 변동이 초래되고 있는 것으로 볼 수 있다(Figure 3, Figure 7). 그러나 여기서 수문량의 절대량이 증가하고 있으나 유출특성에 대한 변화가 실제 일어나고 있는지에 대한 논의는 유출률의 변동을 통해 검토해 볼 필요가 있다. 다시 말하여 유출률은 유역의 건조상태를 나타내고 기후와 수문간의 상호관계를 나타내는 열쇠이며, 유출고는 유출률과 함께 수문학의 기초적 요소이다(新井正, 2001).

Figure 10은 강수량과 유출률 그리고 증발산량간의

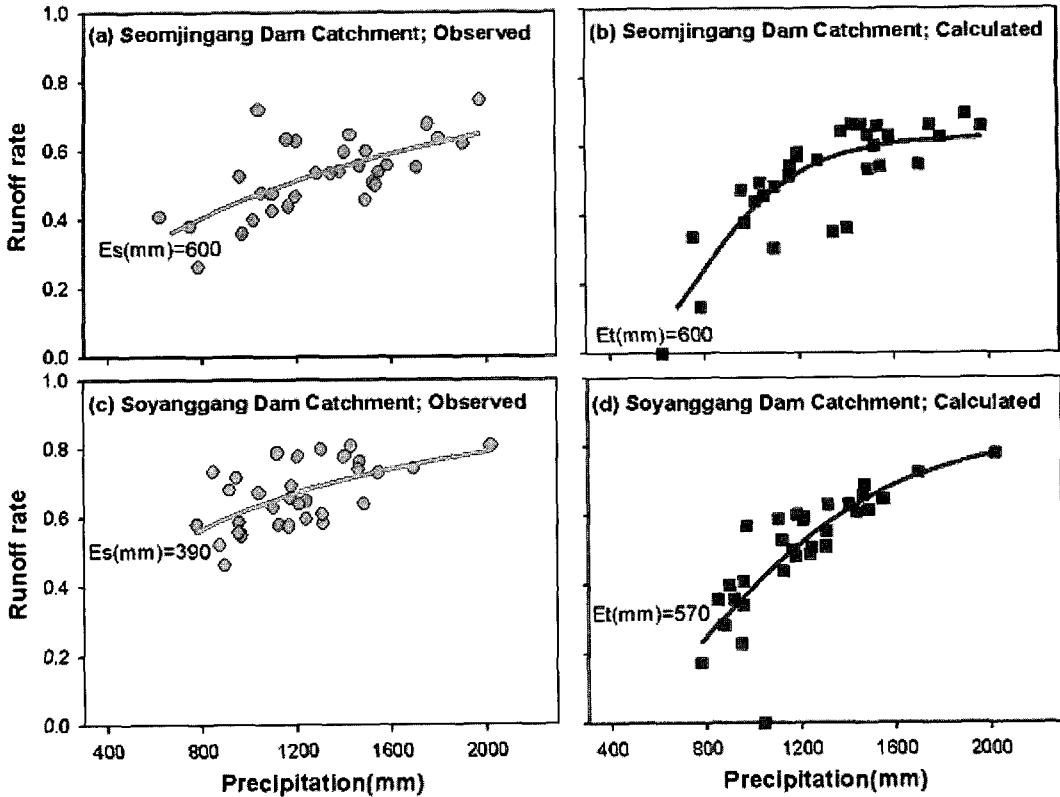


Figure 10. Relation annual runoff rate and annual precipitation. Trend curves are annual mean evapotranspiration amount( $E_s$  or  $E_t$ ).  $E_s$ :  $P(\text{precipitation}) - R(\text{runoff depth})$ ,  $E_t$ : calculated from Penman-FAO24 method.

상호관계를 나타낸 것이다. 증발산량은 연유출물, 연강수량 변동에 비해 비교적 안정되어 있으므로 강수량 변동에 따라 유출물이 일정하게 나타난다고 말할 수 있다. 樋根勇·竹内浩(1971)는 만약 강수량과 유출량에 대한 관측자료의 신뢰도가 매우 높은 경우 Figure 10에 나타난 각 점은 45°선에 평행한 대상분포를 할 것이라고 기술하고 있다. 본 연구에서 사용한 자료들의 신뢰성이 높다고 간주할 경우 일정증발산량( $E_s$ ,  $E_t$ )을 나타낸 곡선을 따라 유출물이 결정되며 강수량이 많을수록 그 편차가 작아지고, 1,200mm이하일 때 그 편차가 크게 나타나고 있다. 그 이유로는 강수량이 적을수록 유출량에 미치는 그 영향이 커지게 되고 강수량이 많아질 경우 상대적으로 강수량이 유출물에 미치는 영향이 작아지기 때문이다(樋根勇·竹内浩, 1971). 연구대상 유역의 연강수량은 그 변동의 폭이 크지만

증가하고 있으며(Figure 3), 그 결과 유역으로부터 유출량 즉 유출고 역시 증가하고 있는 것으로 나타났다(Figure 7, Figure 8).

그리고 기후요소의 변화가 실제 수문특성에 미치는 정도를 파악하기 위해서는 유역의 물수지와 유출특성을 좌우하는 유출물의 변동을 살펴볼 필요가 있다. Figure 11은 관측값으로부터 산정된 연유출물과 기후학적 물수지법에 의해 산정된 연유출물의 경년변화이다. 먼저 실측값에 의한 유출물의 변동에 비해 기후학적 물수지법에 의한 유출물의 경우 그 변동의 편차가 크게 나타난다. 그리고 실측 유출물의 변동을 나타내는 5년 이동평균에 대한 회귀식은 각각  $\text{Runoff rate}(\text{mm}/\text{y}) = -0.0009x + 0.539$ ,  $\text{Runoff rate}(\text{mm}/\text{y}) = -0.0035x + 0.7207$ 로 모두 음의 기울기 즉 미약하나마 아주 약간씩 감소하는 경향을 보이고 있다. 기후요소

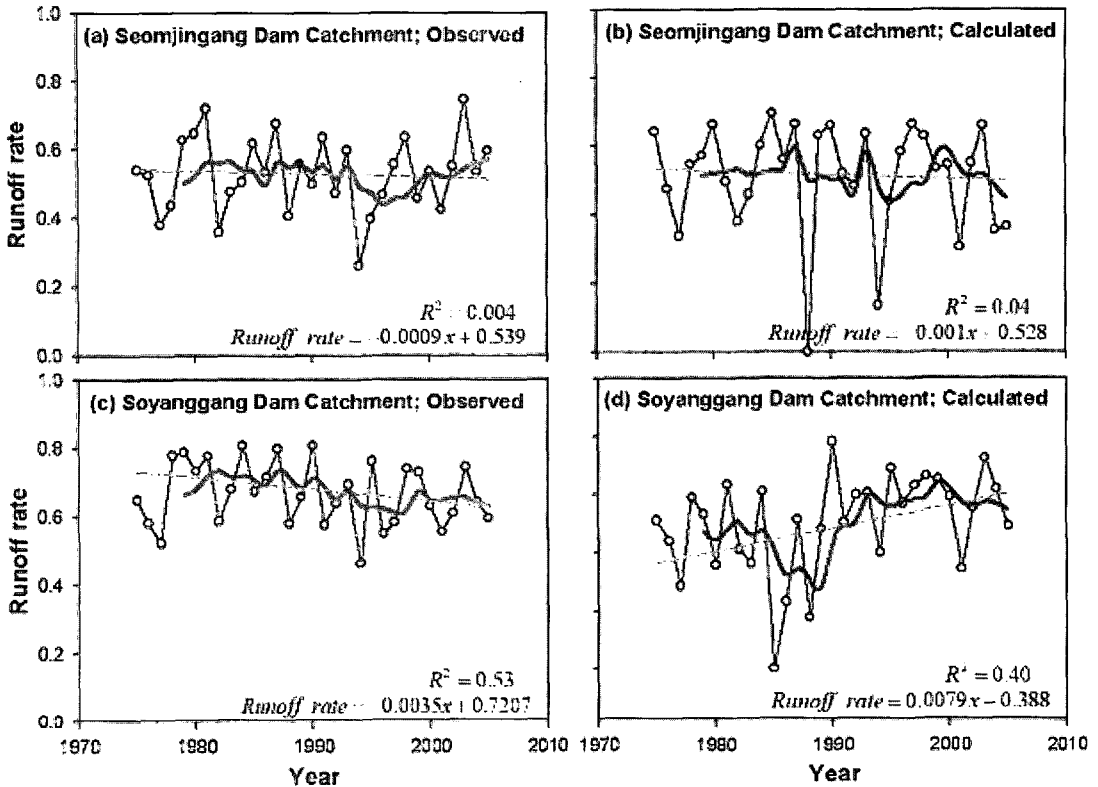


Figure 11. The time series of runoff rate in Seomjingang Dam and Soyanggang Dam Catchment. The circle line shows annual values; the thick line shows a 5-year running mean; the dotted line is regression line.

에 의존한 유출률의 경우 섬진강댐 유역에서는 실측값과 마찬가지로 감소하는 경향을 보인다. 여기서 전체적인 변량들의 경향을 크게 왜곡하는 것으로 보이는 Figure 11(b)의 이례점(1895년)을 배제하면 기후학적 물수지법에 의해 계산된 유출률은  $0.006x + 0.4217$  ( $R^2 = 0.47, r = 0.69$ )의 관계식을 가져 전혀 상반된 결과 즉 매년 약간씩 증가하는 경향을 보인다. 이때 결정계수 또한  $0.04 (r = 0.2)$ 에서  $0.47 (r = 0.69)$ 로 크게 개선되어 변량들의 표준편차가 크게 줄어든다. 소양강댐 유역의 물수지법에 의해 계산된 유출률의 변동은  $\text{Runoff rate}(\text{mm}/\text{y}) = 0.0079x + 0.388$ 의 관계식으로 나타낼 수 있으며 전체적으로 약간씩 증가하는 경향을 보인다. 다시 말해서 실측값에 기초한 유출률의 경우 기후요소 변동과 상반된 결과를 나타내고, 기후요소만을 고려한 유출률의 경우 기후변동을 그대로 반영하는 결과를 보이고 있다.

본 연구에서 사용한 기상자료와 수문관측 자료에 대한 신뢰성과 정밀도에 관한 논의는 중요한 논점이 될 수 있으나 오늘날 많은 기후변화 예측모델에 사용되고 있는 기상자료 또한 이를 피할 수 없다. 그러나 미래의 불확실한 환경변화와 수자원 예측을 하는데 있어서 관측지점이 절대 부족하고 관측자료 역시 제한적이라는 현실적인 문제가 있지만 기후변화와 관련하여 수자원 측면에서의 지속적인 모니터링과 정량적 영향평가를 통해 장기적인 대응책 마련이 선행되어야 할 것이다.

## 7. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 수문요소의 변동을 파악하기 위해 섬진강댐과 소양강댐 유역의 물순환 과정에 미치는 영향을 분석·평가하였다. 그 결과를 정

리하자면 다음과 같다.

먼저 지난 30년간 기온과 강수량은 점차 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으나 증발산량은 지역에 따라 작용하는 복잡한 기후요소와 접지기후에 따라 상이하게 나타나고 있다. 그리고 연강수량의 증대와 함께 연유출고의 증대는 절대 유출량의 증대를 불러 오고 있어 댐과 같은 인공구조물의 안정성과 수자원관리에 많은 어려움 예상된다고 볼 수 있다. 그러나 기후요소와 수문요소간의 상호관계를 나타내는 유출률의 경우 섬진강댐 유역에서 계산값과 관측값 모두 음의 변화를 나타내고 있으나 큰 변화는 없었다. 소양강 댐 유역의 경우 실측값은 음의 변동을 기후요소만 고려된 계산값은 정의 경향을 각각 나타내고 있어 지구온난화에 의한 기후요소의 변화는 유출량 자체의 증대를 초래하고 있지만, 유출특성 즉 유출률의 변화에는 아직 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 유역의 유출 특성은 기후요소뿐만 아니라 지표면의 피복변화와 택지개발, 토지이용 등과 같은 인간의 개입역시 중요한 요인으로 작용하므로 이에 대한 고찰이 병행되어야 할 것으로 사료된다.

그리고 과학적인 관측자료의 축적은 전 지구적으로 150년에 불과하며 지질학 또는 고생물학적 자료를 통해 유추한 기후자료는 이보다 훨씬 이전의 자료를 제공할 수 있지만 정확도면에는 다소 문제가 있다(신경섭, 2003). 그러나 21세기에 전개된 우리나라 기온변화와 강수량변화는 정도의 차이는 있지만 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 이러한 기후변화는 유역의 유출량과 유출률에 영향을 미쳐 수자원관리와 재난관리에 큰 어려움이 예상되고 있다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 따라서 기후변화에 대한 적절한 대응방안을 강구하기 위해서는 유역의 기후학적 조건과 수문학적 변동을 야기시키는 요인들에 대한 깊은 이해가 필요로 하며 보다 조밀한 수문관측망의 구축과 신뢰도 높은 자료의 축적이 전제되어야 할 것으로 본다.

## 文獻

- 강만석, 1984, "Thornthwaite방법에 의거한 남한의 기후변동경향," 지리학연구, 9, 507-519.
- 건설교통부, 1997, 수자원 계획의 최적화 연구: 용수수요 추정시스템 개발 연구, IPD-97-1, 한국수자원공사.
- 국가수자원관리 종합정보 홈페이지 (WAMIS; <http://www.wamis.go.kr/main.aspx>).
- 고희원 · 황은 · 김시원, 1989, "Penman식의 적용에 있어서 지역별 일사량 추정을 위한 계수의 산정," 한국농공학회지, 31(4), 96-110.
- 김도정, 1970, "최근에 있어서의 기후변화와 변동에 관하여, 특히 기온변화를 중심으로," 대한지리학회지, 5, 69-74.
- 김병식 · 김형수 · 서병하 · 김남원, 2004, "기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향," 한국수자원학회논문집, 37(3), 185-193.
- 김병식 · 김형수 · 서병하, 2005, "기후변화가 수자원에 미치는 영향과 평가," 자연과 문명의 조화(구 토목), 53(4), 30-42.
- 김승, 1999, "이상기후에 따른 홍수관리대책," 토목, 47(5), 16-20.
- 김연옥, 1963, "Thornthwaite 신분류법에 의한 한국의 기후구분," 이화여대 한국문화원논문집, 3, 235-251.
- 김연옥, 1970, "Thornthwaite방법에 의한 한국의 수분수지," 지리학, 5, 1-29.
- 김영오, 1999, "기후변화를 고려한 수자원관리 기법," 토목, 47(5), 29-33.
- 김은희 · 김명기 · 이우섭, 2005, "최근 30년간 한반도 일강수강도의 지역적 특성," 한국지구과학회지, 26(5), 404-416.
- 류상범 · 김영아, 2000, "광릉수목원에서의 증발산량 변화: 가을에서 초겨울까지," 한국기상학회지, 36(1), 43-50.
- 박병익, 1996, "한국의 기온 경년변화와 이에 대한 도시화의 영향에 대하여," 지리 · 환경교육, 4, 109-119.
- 백경록 · 최종남 · 유철상 · 김종훈, 2000, "강우-유출관계의 변동성에 관한 고찰," 대한토목공학회지, 20(3-B), 377-386.
- 배덕효, 2005, "기후변화가 수자원에 미치는 영향과 과제," 국토, 281, 32-38.

- 송태용, 1966, "Thornthwaite 신기후분류에 의한 한국기후," 경북대학교 논문집, 10, 77-96.
- 서용원 · 이승현 · 김영오 · 이동률, 2000, "대청댐 운영에 대한 기후변화 영향평가," 대한토목학회 학술발표 논문집, 2000(3), 427-430.
- 신경섭, 2003, "물과 기후변화: 한국의 강수량 추이와 전망," 국토, 259, 14-23.
- 신영규, 2004, "대관령 지역의 산림 소유역과 농경지 소유역의 수질비교," 대한지리학회지, 39(4), 544-561.
- 안상진 · 김종변, 1988, "소유역의 증발산량 산정방법에 의한 비교 연구," 건설기술연구소 논문집, 6(2), 110-120.
- 안재현 · 유철상 · 윤용남, 2001, "GCM결과를 이용한 지구 온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석," 한국수자원학회 논문집, 34(4), 335-345.
- 양해근 · 김종일, 2004, "도시화에 수반되는 광주천 유역의 물수지 변화," 한국지역지리학회지, 10(1), 192-205.
- 이승호 · 권원태, 2004, "한국의 여름철 강수량 변동: 순별 강수량을 중심으로," 대한지리학회지, 39(6), 819-832.
- 이용호 · 임규호 · 이수정, 2000, "한반도와 주변 지역 물수지의 연변화," 한국기상학회지, 36(2), 257-268.
- 이현영, 1975, "대구를 중심으로 낙동유역분지의 물수지 연구," 지리학, 11, 65-77.
- 장기환, 1999, "이상기후현상과 다목적댐 운영," 토목, 27(5), 34-44.
- 전성우 · 정위철 · 이동근, 2004, 기후변화영향평가모형 개발: 물관리부분을 중심으로, KEI-2004-RE-10, 한국환경정책 · 평가연구원.
- 정현숙 · 임규호 · 오재호, 1999, "서울 지역 강수량의 시계열에 나타난 시간 변동성 해석," 한국기상학회지, 35(3), 354-371.
- 차은정, 2001, "집중호우의 원인은 지구온난화 때문인가?: 기후변화에 따른 강수량과 물순환의 변화에 대한 개념적 이해," 한국수자원학회지, 34(6), 62-64.
- 최영은 · 권원태, 2005, "지리학에서의 기후 변화 연구," 한국기상학회지, 41(2-1), 249-262.
- 허창희 · 강인식, 1988, "한국 지역 강수의 변동성에 관한 연구," 한국기상학회지, 24(1), 38-47.
- 關口武 · 吉野正敏, 1953, "日本の流域別水収支の年変化様式," 地理評論, 26(3), 110-121.
- 樞根勇, 1969, "水収支観測値の精度について," 東京教育大學地理學研究報告, 13, 129-137.
- 樞根勇 · 竹内浩, 1971, "本邦における河川の年流出率について," 地理學評論, 44, 347-355.
- 新井正, 1976, "日本の水収支: 概要と問題點," 立正大學文學部論叢, 56, 95-125.
- 新井正, 1979, "東京付近の氣候學的水収支とその都市化による影響," 立正大學文學部論叢, 65, 1-16.
- 新井正, 2001, "流出率と流出高に關する考察," 日本水文科學會誌, 31(1), 3-10.
- 梁海根, 1996, "小河内貯水池における水収支と流出率," 地域研究, 37(1), 1-10.
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950, *Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological and Irrigation Data*, USDA-SCS TP96.
- Change, L.H., Hunsaker, C.T., and Draves, J.D., 1992, Recent research on effects of climate change on water resources, *Water Resources Bulletin*, 28(2), 273-286.
- Choi, Y.E., 2002a, Changes on frequency and magnitude of heavy rainfall events in Korea, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 4, 269-282.
- Choi, Y.E., 2002b, Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 11, 189-203.
- Choi, Y.E., Jung, H.S., Nam K.Y., and Kwon, W.T., 2003, Adjusting urban bias in the regional mean surface temperature series of South Korea, 1968-1999, *International Journal of Climatology*, 23, 577-591.
- Chow, V.T., Maidment, D.V., and Mays, L.W., 1988, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill College.
- Chung, Y.S. and Yoon, M.B., 1999, Recent climate change and related factors observed in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 35(3), 310-318.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noquer, M., Van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C. A.(eds.), 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC Contribution of*

- Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Kayane, I., 1968, Variation in annual runoff ratio, *Freiburger Geographische Hefte*, 6, 25-32.
- Lettenmaier D.P. and Burges, S.J., 1978, Climate change: detection and its impact on hydrologic design, *Water Resources Research*, 14(4), 679-687.
- Lim, G.H. and Jung, H.S., 1992, Interannual variation of the annual precipitation at Seoul, 1771-1990, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 28(2), 125-132.
- Ludwing, W., Serrat, P., Cesmat L., and Garcia-Esteves, J., 2004, Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Têt River(Southern France), *Journal of Hydrology*, 289, 204-221.
- Mohseni, O. and Stefan, H.G., 1998, A monthly stream flow model, *Water Resources Research*, 34(5), 1287-1298.
- Penman, H.L., 1948, Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings Royal Society of London*, 193(Ser. A), 120-145.
- Penman, H.L., 1956, Estimating evaporation trans, *American Geophysical Union*, 37(1), 42-50.
- Rind, D., 1993, Models see hard rain, drought if CO<sub>2</sub> doubles, *Climate Alert Newsletter*, 6(2), 120-125.
- Schwarz, H.E., 1977, Climate change and water supply: How sensitive is the northeast?, *Climate, Climate Change, and Water Supply*, U.S. Nation Academy of Sciences. Washington, D.C., 111-120.
- Saua, F., Kenneth, J., Booteb, W., McNair, B., Jonesc, J.W., and Inés Mínguezd, M., 2004, Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models, *Agronomy Journal*, 96, 1243-1257.
- Thornthwaite, C.W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, *The Geographical Review*, 38, 55-94.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., 1957, Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance, DREXEL Institute of Technology, Lab. of Climatology.
- Trenberth, K. E., 1998, Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates with climate change, *Climatic Change*, 39, 667-694.
- Trenberth, K. E., 1999, Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*, 42, 327-339.
- Yang, H.K., 2006, Impact of climate change on hydrological disasters, *Journal of The Korean Geomorphological Association*, 13(3), 45-54.
- 교신 : 양해근, 143-701, 서울 광진구 화양동 1, 건국대학교 이과대학 지리학과(이메일: hydroyang@hotmail.com, 전화: 02-450-3434)
- Correspondence: Heakun Yang, Department of Geography, Science College, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-701, Korea(email: hydroyang@hotmail.com, phone: +82-2-450-3434)
- 최초투고일 07.05.29.  
최종접수일 07.06.20.