

물수지 방정식을 이용한 대청댐 건설에 따른 수문환경의 변화 분석

An Analysis of Hydrologic Changes due to Daechung Dam Construction using Water Balance Equation

안재현* / 유철상** / 윤용남***

Ahn, Jae Hyun / Yoo, Chulsang / Yoon, Yong Nam

Abstract

The purpose of the present study was to evaluate the hydrologic changes and the effect of runoff characteristics of a large river basin due to construction of a dam. The changes of land use and vegetation are quantified from remote sensing film taken before and after dam construction. Evapotranspiration, runoff and soil moisture were calculated using water balance equation. It was found that the albedo of watershed upstream of the dam is decreasing due to the decreasing of vegetation and the increasing of water surface and forest, and the increasing of potential evapotranspiration and soil moisture led to increasing actual evapotranspiration and runoff ratio after dam construction.

keywords : dam, hydrologic condition, water balance equation, albedo, soil moisture

요 지

댐에 의한 환경의 변화는 생태계의 변화나 댐 주변의 안개일수 증가와 같은 국지기상의 변화도 있으나 본 연구에서는 수문환경의 변화에 초점을 맞추어 댐 건설이후 어떤 수문환경의 변화가 발생하며, 이러한 수문환경의 변화가 유역의 유출특성에 어떤 식으로 영향을 주는지에 대해 정량적으로 살펴보았다. 수문환경의 변화를 살펴보기 위해서 대청댐 건설 전후의 댐 상류에서의 토지이용과 식생의 변화를 비교하였으며, 물수지 방정식을 이용하여 증발산량, 유출량 및 토양 함수비 등을 산정하고 댐 건설에 따른 변화 양상을 분석하였다. 댐의 건설로 인해 댐 상류에서는 삼림의 증가와 초지의 감소로 알베도가 감소하였고 잠재증발산량과 토양수분량이 증가하였으며, 이로 인해 실제증발산량이 증가하였다. 또한 댐 건설 후의 유출율이 약간 증가하였다. 이상의 분석을 통해 댐 건설에 따른 수문환경의 변화를 정량적으로 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 댐, 수문환경, 물수지 방정식, 알베도, 토양수분

* (주)건설엔지니어링 수자원부 차장

Vice Director, Kunil Engineering Co., 891-44 Daechi-Dong, Seoul 135-280, Korea

(E-mail : wr@korea.com)

** 고려대학교 환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Environmental Eng., Korea Univ., Chungnam 339-700, Korea

*** 고려대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

1. 서 론

우리나라의 하천들은 대부분 유역면적이 작고 유로 연장이 짧으며, 산지가 많은 지형특성상 하천의 경사도 급한 경우가 많다. 이와 같은 특성으로 인해 하천에서의 평수량과 갈수량은 작은 반면 홍수량은 커서 연간 하천유량의 변동이 극심하며 수자원개발 및 관리라는 측면에서 대단히 불리한 여건을 가지고 있다. 따라서, 이러한 하천의 유역특성을 감안하여 조기에 바다로 유출되는 하천수를 저류함으로써 용수확보율을 제고하고, 아울러 홍수조절효과를 얻고자 하는 것이 우리나라 수자원 개발정책의 골간이 되어왔으며, 이는 대규모 다목적 댐의 건설로 이어져 왔다(윤용남, 1998).

다목적 댐은 이수와 치수목적은 모두 만족시키기 위해 건설된다. 기본적으로 댐 건설에는 댐 건설 당시의 수문특성이 고려되며 이러한 수문특성은 댐 건설 이후에도 지속된다는 가정을 가지고 댐 운영에 임하게 된다.

그러나 댐의 건설은 댐 주변의 자연 및 사회 환경의 변화를 유발하게 되고 이는 구체적으로 토지이용의 변화로서 나타난다. 아울러 댐 상류의 경우에 있어서는 개발제한에 따른 식생의 발달 및 댐에 의한 수표면적의 증가와 댐 하류의 경우 댐의 조절기능에 따른 하류 홍수량의 변화로 하류 하도 및 유황의 변화 등이 발생한다.

따라서, 이러한 다목적의 건설에 따른 여러 변화가 적지 않은 부정적인 영향을 주는 것도 사실이다. 이것은 댐의 건설로 생성되는 대형 인공호가 수분 및 열수지의 변화를 유발하여 안개 일수의 증가 및 일조율의 감소에 따른 이상 저온 현상 등의 기상 변화를 초래하게 되며, 이는 농작물과 가축의 생육 및 주변에 거주하는 사람들의 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

표 1은 대규모 다목적 댐이 위치한 춘천, 안동, 보

은, 충주 지역의 안개일수와 일조시간을 댐 건설전후에 대해 비교한 것으로서, 안개일수는 전 지점에서 댐 건설 후에 거의 2배 정도씩 증가하고 있으며 일조시간은 춘천 지점을 제외한 나머지 지점에서 큰 폭으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 춘천의 경우는 소양강댐이 생기기 이전에 주변에 이미 춘천댐과 의암댐이 건설되어 있었기 때문에 일조시간이 소양강댐이 생긴 이후에 큰 변화 없이 오히려 약간 증가하는 것으로 판단되어진다(이종범, 1981).

그러므로, 이러한 결과로부터 댐의 건설은 주변 지역의 안개일수 증가 및 일조시간 감소를 초래하게 됨을 확인할 수 있다.

댐 건설로 인한 기상 변화에 관련된 연구를 살펴보면, 이종범(1981)은 춘천댐, 의암댐, 소양강댐 등에 인접한 춘천지역의 안개일수가 댐 건설 이후에 증가하고, 특히 소양강댐의 건설이 춘천의 안개일수 증가에 가장 큰 영향을 끼침을 밝혔으며, 홍성길(1982)은 안동댐 건설 전후의 안개일수를 비교하여 댐 건설후의 안개일수가 약 10일 정도 증가함을 보였다. 또한 남제철 등(1995)은 안동지역 인공호 주변의 안개에 대한 분석을 통해 호수 인근 지역보다 댐 하류 저지대에 안개일수 많음을 보였다.

윤진일 등(1997)은 주암댐의 건설에 의해 안개일수의 증가 및 일조량의 감소가 발생하였으며, 이로 인해 작물의 생장이 댐 건설 전에 비해 감소함을 보였다.

이진원 등(1993)은 우리나라 5개 수계의 하상계수가 댐 건설 후에 감소하여 유황이 개선되었음을 보였으며, 이재형 등(1994)은 금강하구호의 월 유출량이 댐 건설 후에 증가함을 보였다. 또한 윤용남 등(1998a, 1998b)은 대청댐의 건설에 따른 수문환경의 변화를 분석하여, 홍수기에 댐 하류에서의 침투유출 감소 및 갈수기에 하천유지유량을 유지시키는 댐의 역할을 판단하고, 댐 건설 후에 댐 상류지역 유출율의 미소한 증가를 보인 바 있다.

표 1. 댐 건설에 따른 안개일수와 일조시간의 변화

댐 명	준공년도	인근 기상관측소	자료기간	안개일수(일수/년)		일조시간(시간/년)	
				댐 건설 전	댐 건설 후	댐 건설 전	댐 건설 후
소양강	1973년	춘 천	'66-'99	37	64	2116	2211
안 동	1976년	안 동	'72-'99	43	69	2706	2259
대 청	1980년	보 은	'72-'99	25	50	2565	2366
충 주	1985년	충 주	'72-'99	47	81	2587	2281

주) 기상연보(기상청, 1966-1999년)

이러한 연구 결과로부터 댐 건설이 안개일수 증가 및 일조율 감소 등의 기상 변화를 초래하는 부정적인 영향과 하천유통의 개선 및 이·치수에 대한 기여 등의 긍정적인 효과가 공존하고 있음을 알 수 있으며, 이는 댐의 역할에 대한 평가는 어떠한 기준을 가지고 접근하느냐에 따라 긍정적 혹은 부정적으로 판단할 수 있음을 보여주는 것이다.

이와 같은 댐에 의한 환경의 변화는 생태계의 변화나 댐 주변의 안개일수 증가와 같은 국지기상의 변화도 있으나 본 연구에서는 수문환경의 변화에 초점을 맞추어 댐 건설이후 어떤 수문환경의 변화가 발생하며, 이러한 수문환경의 변화가 유역의 유출특성에 어떤 식으로 영향을 주는지에 대해 정량적으로 살펴보고자 한다.

이를 위해 대청댐이 위치해 있는 금강유역을 대상 유역으로 하였으며, 댐에 의한 운영 효과로 인위적인 유량의 변화가 발생하는 댐 하류 유역을 제외하고 댐 상류 유역에 대해서만 분석을 실시하였다.

수문환경의 변화를 살펴보기 위해서 대청댐 건설 전후의 댐 상류에서의 토지이용과 식생의 변화를 비교하였으며, 물수지 방정식을 이용하여 증발산량, 유출량 및 토양 함수비 등을 산정하여 댐 건설에 따른 변화 양상을 분석하였다.

2. 분석 방법

2.1 물수지 방정식

유역의 유출은 강수로 인한 물의 증발과 증산, 침투와 침투, 지하수 등의 성분과정을 거치면서 발생하게 되며, 이러한 유출은 그 유역의 지상학적 인자와 기후학적 인자의 영향에 따라 그 양상을 달리하게 된다. 유역의 유출에 영향을 끼치는 지상학적 인자로는 유역의 면적, 경사, 방향성, 형상, 고도 등과 유로의 특성이 있으며, 기후학적 인자로는 강수, 차단, 증발과 증산 등이 있다(윤용남, 1998). 그러나, 이러한 여러 인자의 영향을 받는 유출을 양적으로 따져본다면 다음 식(1)과 같은 간단한 물수지 방정식의 형태로 표시할 수 있다.

$$\frac{dZ}{dt} = P - R - ET \quad (1)$$

여기서, Z 는 토양함수비(L), P 는 강수량(L/T), R 은 유출량(L/T), ET 는 증발산량(L/T)을 의미한다.

유역의 증발산량 ET 는 잠재증발산량과 토양수분의 함수로부터 결정되어지며, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ET = f(S) \cdot ET_p \quad (2)$$

여기서, S 는 토양함수비, $f(S)$ 는 토양함수비의 함수, ET_p 는 잠재증발산량(L/T)을 의미하며, 토양함수비 S 는 토양수분량 Z 와 최대 토양수분량 Z_{max} (L)의 비이다.

이러한 유역의 증발산량과 잠재증발산량의 관계를 나타내는 $f(S)$ 는 대상 유역의 식생 상태에 큰 영향을 받는다(Thorntwaite와 Mather, 1955; Budyko, 1956; Philip, 1957; Pierce, 1958). 본 연구에서는 Kaczmarek(1990), Yates 등(1998)에 의해 적용된 식(3)과 같은 관계식을 이용하여 $f(S)$ 를 산정하였다.

$$f(S) = \frac{5S - 2S^2}{3} \quad (3)$$

유역에 내린 강수의 침투에 따른 유출의 변화는 여러 형태로 표시할 수 있지만, 일반적으로 다음의 식(4)와 같은 토양함수비의 함수로 나타낼 수 있다(Rodriguez-Iturbe 등, 1991).

$$R = \alpha S^\beta \cdot P \quad (4)$$

여기서, α 와 β 는 매개변수이다. 따라서, 식(3)과 (4)를 식(1)에 대입하면 식(5)와 같은 물수지 방정식을 얻을 수 있게 된다.

$$\frac{dZ}{dt} = (1 - \alpha S^\beta)P - \left(\frac{5S - 2S^2}{3}\right)ET_p \quad (5)$$

본 연구에서는 대청댐 상류 유역의 실측 강수량 및 유출량 자료를 사용해서 매개변수 α 와 β 를 결정하였으며, 식(5)를 이용하여 댐 건설 전후의 유출량, 증발산량, 토양함수비를 산정하여 댐 건설에 따른 수문환경의 변화를 분석하였다.

2.2 잠재증발산

2.2.1 증발산량

증발(evaporation) 현상은 수표면 혹은 습한 토양 표면의 물분자가 태양이 방사하는 열에너지를 얻어 액

체상상태에서 기체상태로 변화하는 과정으로서 온도, 바람, 상대습도, 대기압, 수질 및 수표면의 성질과 형상이 이 현상을 지배한다. 또한 증산(transpiration) 현상은 식물의 엽면을 통해 지중의 물이 수증기의 형태로 대기에 방출되는 것으로서 식물의 종류, 밀도, 성장 속도 등과 온도, 대기복사열, 바람, 토양의 함유수분 등의 영향을 받는다. 증발산(evapotranspiration)이란 이와 같은 증발과 증산에 의한 물의 수증기화를 총칭하는 말로서 대상 유역으로부터의 증발과 증산을 구분하여 해석할 수는 없으므로 유역내의 수면이나 토양, 눈, 얼음, 식생피복 등으로부터의 증발과 증산을 통틀어 대기 증으로의 물의 손실로 취급하게 된다.

증발산량을 산정하는 방법으로는 증발산제에 의한 측정법, 물수지법, 에너지수지법, 공기동역학적 방법, 조합법, 기상자료를 이용한 방법 등이 있으며, 이들 방법 중 어떤 방법을 선택해야 하는가는 이용할 수 있는 자료의 종류 및 계산의 적합성 등에 따라 결정될 수 있을 것이다. 증발산량을 산정하는 대표적인 공식들은 Penman(1948), Priestley-Taylor(1972), Complementary Relationship(Morton, 1965, 1976, 1983; Brutsaert와 Stricker, 1979), Penman-Monteith(1965) 방법 등이 있으며, 본 연구에서 사용한 Penman 방법에 대한 설명은 다음과 같다.

Penman(1948)은 에너지수지법과 공기동역학적방법을 조합하여 증발량을 산정할 수 있는 Penman 방법을 제시하였다. Penman 방법은 기상자료를 이용하여 계산되어지며, 필요한 자료가 모두 입력되고 기본 가정이 만족되어진다면 비교적 정도 높은 결과를 산정할 수 있다(Chow 등, 1988). 또한 잠재증발량의 산정에도 적용할 수 있다(Kim과 Entekhabi, 1997).

이러한 Penman 방법을 이용해서 증산량을 포함한 증발산량을 산정하기 위해, 원래의 Penman 방법을 식생표면의 증발과 증산을 고려할 수 있도록 수정한 Penman 방법이 제안되었으며(Van Bavel, 1966) 식(6)과 같다. 식(6)에서 우변의 첫 번째 항은 에너지수지 항을, 두 번째 항은 공기동역학적 항을 의미한다.

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (6)$$

여기서, ET 는 증발산량(mm/day), Δ 는 포화수증기압의 곡선의 기울기 $\Delta e_a / \Delta T$ (kPa/°C)이며, γ 는 습도측정상수(kPa/°C), R_n 는 순복사에너지(mm/day), E_a 는

증발량(mm/day)이다.

2.2.2 잠재증발산량

만약, 저수지 증발의 경우처럼 물이 무한정 공급된다면 증발산량은 기상학적인 변수(복사에너지, 기온, 증기압, 풍속 등)들에 의하여 영향을 받게 되며, 이렇게 물 공급이 제한되지 않는 상태의 증발산을 잠재증발산(potential evapotranspiration)이라 한다. 이것은 일반적인 기상학적 조건하에서의 최대 가능손실량을 의미한다. Thornthwaite(1948)에 의하면 잠재증발산량은 유역의 토양이 수분으로 완전 포화되어 있는 상태에서의 증발산량을 의미하며, 지표면의 성질이나 조건에는 전혀 무관하다. 따라서 잠재증발산량은 유역이 식생으로 완전 피복되어 있을 경우에는 저수지면으로부터의 증발량과 다를 것이 없다.

잠재증발산량을 산정하는 방법에는 pan 증발량을 이용하는 방법, Penman 방법, Thornthwaite 방법(1948), Blaney-Cridle 방법(1950) 등이 있는데, 일반적으로 pan 증발량을 이용하는 방법과 Penman 방법이 잠재증발산량의 산정에 주로 이용되고 있다(Bras, 1990). 본 연구에서는 잠재증발산량의 산정에 Penman 방법을 이용하였으며, 실측 pan 증발량과의 비교를 통해 그 적합성을 검토하였다.

3. 댐 건설에 따른 수문환경의 변화 분석

3.1 금강유역의 현황

본 연구는 대청댐이 위치해 있는 금강유역을 대상으로 하였다. 금강유역은 한반도의 중서부에 위치하며, 충청남도, 충청북도의 절반 정도와 전라북도의 약 1/4 및 경기도 및 경상북도 일부를 포함하는 유역 면적 9,886km²의 대유역으로서, 대략 남한면적의 1/10정도인 남한 제3의 유역이며 본류의 유로 연장이 393.9km에 이른다(한국수자원공사, 1992). 금강 유역에 위치한 대청 다목적댐은 금강 하구로부터 150km 상류, 대전 및 청주시로부터 각각 16km 지점에 위치하고 있으며, 본 댐 이외에 역조지지 대전·청주 발전소와 3개의 부댐으로 구성되어 있다.

유역면적 4134.54km², 총 저수용량 1490백만m³로 저수용량 기준으로 우리나라에서 세 번째 규모인 대청댐은 1975년 착공되어 1980년에 완공되었으며, 댐 하류의 홍수 재해를 경감할 뿐 아니라 급속도로 증가하고 있는 인접 대도시의 생활 및 공업용수를 공급하고 있

표 2. 대청댐 상류 유역의 기상관측소 현황

지점번호	지점명	북 위	동 경	해발높이 (EL.m)	관측개시년	비 고
131	청 주	36° 38'	127° 26'	59.0	1967	증발량 결측(1991-)
133	대 전	36° 22'	127° 22'	67.2	1969	-
146	전 주	35° 49'	127° 09'	51.2	1919	증발량 결측(1991-)
226	보 은	36° 29'	127° 44'	170.0	1973	증발량 결측(1991-)
284	거 창	35° 40'	127° 55'	224.9	1973	증발량 결측(1991-)

표 3. 대청댐 상류 유역의 토지이용 변화

기 간	토지이용 구분	Water (물)	Urban (도시)	Forest (삼림)	Vegetation (초지)	Swamp (습지)	Bare (나지)	계
		면적(km ²)	면적비(%)	면적(km ²)	면적비(%)	면적(km ²)	면적비(%)	
1971~80년	면적(km ²)	22.68	40.46	2432.23	1580.73	17.62	40.82	4134.54
	면적비(%)	0.5	1.0	58.8	38.2	0.4	1.0	100.0
1981~90년	면적(km ²)	98.42	47.68	2835.14	994.00	118.60	40.70	4134.54
	면적비(%)	2.4	1.2	68.6	24.0	2.9	1.0	100.0
1991~99년	면적(km ²)	98.44	52.68	3239.20	498.17	205.42	40.63	4134.54
	면적비(%)	2.4	1.3	78.3	12.0	5.0	1.0	100.0

으며 금강하류의 관개용수와 수력발전 및 금강하구의 염해 방지에도 기여하고 있다.

대청댐 상류유역의 강수량 자료 및 잠재증발산량 계산에 필요한 기상자료를 제공하는 5개 기상관측소의 현황은 표 2와 같으며, 가장 최근에 관측을 시작한 보은과 거창관측소의 경우 1973년부터 관측이 시작되었다. 본 연구에서는 대청댐의 완공이 1980년에 이루어졌고, 동시간 기상자료가 최대 1973년부터 사용 가능하기 때문에, 댐 건설 전을 1973-1980년, 댐 건설 후를 1981-1999년으로 분류하여 각각의 기간별로 수문 환경 변화의 분석을 실시하였다.

3.2 토지이용 및 식생의 변화

본 연구에서는 댐 건설로 인한 자연환경의 변화를 정량화하기 위해서 댐 건설을 전후하여 10년 주기의 Landsat 인공위성 영상을 이용하였다. 계절에 따른 변화를 고려하기 위해서 1970년대는 1974년 4월과 1975년 11월 영상을, 1980년대는 1985년 3월과 11월 영상을, 1990년대 1995년 5월과 11월 영상 분석 결과를 평균해서 이용하였으며, 각각의 결과는 각각의 기간을 대변하는 값으로 사용하였다.

3.2.1 토지이용의 변화

인공위성 영상에서 구한 유역별 토지이용의 형태는

Water, Urban, Forest, Vegetation, Swamp, Bare로 구분하였으며, 각각 수표면, 도시, 삼림, 초지, 습지, 나대지를 의미한다. 각각의 기간에 대한 영상분석 결과를 표 3에 정리하였으며, 댐 건설에 따른 토지이용 변화가 잘 나타나고 있다.

먼저, 댐 건설이후 생성되는 인공호수의 영향으로 수표면적의 증가로 댐 건설 전 0.5%에 불과했던 수표면적비가 댐 건설 후에는 2.4%로 증가하고 있다. 도시 지역의 면적비는 댐 건설 후 상류의 도시개발 제한으로 인해 미미하게 증가하였다.

가장 큰 변화를 보이는 것은 삼림과 초지로서 개발 제한에 따른 영향과 댐 상류유역 주민의 이주 등으로 초지는 급격하게 줄어드는 반면에 그에 비례하여 삼림이 급증하는 것을 보여주고 있으며, 이는 뒤에서 언급할 식생의 분석 결과와도 일치하고 있는 현상이다. 또한 습지의 경우도 지속적인 증가 추세에 있으며, 나지의 경우는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 기간별 토지이용의 변화에 대한 분석 결과는 그림 1을 통해서 확인할 수 있다.

이와 같은 토지이용의 변화는 댐 상류 유역에 크게 두 가지 영향을 끼칠 수 있다.

첫 번째는 수표면적 증가에 따른 지하수위의 상승이며, 이는 토양수분의 증가로 이어질 수 있다. 이러한 영향은 증발 가능한 수분의 증가를 의미하므로 증발산

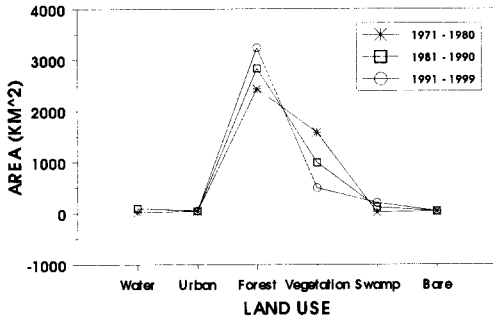


그림 1. 대청댐 상류 유역의 토지이용 변화

량의 증가로 이어지며, 침투량의 감소로 인한 유출량의 증가로 인한 유출율의 상승이 예상되어 진다. 두 번째는 태양복사에너지의 반사계수를 의미하는 알베도(albedo)의 변화로 이는 추후에 산정될 잠재증발산량에 영향을 끼치게 된다.

각각의 기간별로 산정된 토지이용 상황을 이용해서 표 4에 나타난 알베도의 범위를 고려하여 표 5와 같이 기간별 알베도를 계산하였으며, 댐 건설 전에는 0.17, 댐 건설 후에는 각각 0.16과 0.15로 감소하였는데, 이러한 알베도의 변화에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 삼림의 증가와 초지의 감소임을 알 수 있다. 또한, 알

표 4. 토지이용에 따른 알베도의 범위(Ponce 등, 1997)

토지 이용		알베도	토지 이용		알베도	
Water surface	High solar elevation	0.03 - 0.10	Forest land	Bog	0.11 - 0.19	
	Low solar elevation	0.10 - 1.00		Coniferous forests	0.05 - 0.15	
Sea	0.03 - 0.10	Deciduous woodlands		0.10 - 0.20		
Range land	Bluegrass sod	0.20 - 0.30		Mixed hardwoods	0.18	
	Green grass	0.26		Oak forests	0.18	
	Meadows	0.12 - 0.30		Pine forests	0.14	
	Pasture	0.12 - 0.20		Tropical rain forests	0.07 - 0.15	
	Savanna	0.16 - 0.18		Agricultural land	Beets	0.18
Bare ground	Bare surfaces	0.05 - 0.40			Cotton	0.20 - 0.22
	Black soil, dry	0.14	Lettuce		0.22	
	Black soil, moist	0.18	Orchards		0.15 - 0.20	
	Clay	0.20	Potatoes		0.19	
	Dark cultivated soil	0.07 - 0.10	Rice field		0.12	
	Dark soil, wet	0.20 - 0.40	Sugar cane		0.15	
	Deserts	0.20 - 0.45	Tobacco		0.25	
	Desert loam	0.29 - 0.31	Tomatoes		0.20	
	Desert soil, dry	0.26	Wheat cropland		0.13 - 0.20	
	Desert soil, wet	0.10	Snow cover		Average	0.70
	Organic, dard	0.10			Clean firm	0.50 - 0.65
	Rock	0.12 - 0.15			Freshly fallen	0.75 - 0.95
	Sand dunes	0.30 - 0.60			Sea ice	0.36 - 0.50
	Tilled fine loam	0.17 - 0.18	Urban Area	Densely urbanized	0.15 - 0.25	

표 5. 댐 상류 지역의 albedo 변화

기 간	토지이용의 변화 (면적비, %)						Mean Albedo
	Water (0.10)	Urban (0.20)	Forest (0.15)	Vegetation (0.20)	Swamp (0.12)	Bare (0.20)	
1971~80년	0.5	1.0	58.8	38.2	0.4	1.0	0.17
1981~90년	2.4	1.2	68.6	24.0	2.9	1.0	0.16
1991~99년	2.4	1.3	78.3	12.0	5.0	1.0	0.15

주 : ()는 토지이용에 따른 albedo값으로서 water는 0.1, urban은 0.2, forest는 0.15, vegetation은 0.2, swamp는 0.12, bare는 0.2를 사용하였다.

배도의 감소는 태양 복사에너지의 반사율이 줄어드는 것을 의미하며, 이는 잠재증발산량 증가로 이어질 것임을 예상할 수 있다.

3.2.2 식생의 변화

유역 내의 식생 변화는 인공위성의 영상분석으로부터 개략적인 변화를 추정할 수 있고 아울러 영상분석을 통해 산정 되어지는 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 자료로부터 식생의 공간적인 특성이 어떻게 변했는지를 간접적으로 추정할 수 있다.

NDVI는 식물의 잎에 포함된 클로로필이 가시광장대를 잘 흡수하여 반사율은 낮아지게 된다는 원리를 이용한 일종의 지표이므로 영상 촬영당시의 계절이나 구름의 분포, 그리고 기상상태 등에 따라 같은 지역이라 하더라도 반사율이 다르게 나타날 수 있다(신사철, 1996). 따라서 시간에 연속적인 영상을 이용하여 구한 NDVI는 식생의 변화와 관련된 추세나 경향을 판단할 수 있지만 한 시점의 위성자료에서 구한 NDVI자료는 식생의 변화와 관련하여 평균적인 변화의 개념으로는 사용하기 어렵다. 그러나 NDVI는 정규화과정(normalization process)을 거친 후 식생의 공간적인 특성을 파악하는데 이용될 수 있다.

식생의 공간적 분포특성 변화는 상관거리(correlation length)를 이용하여 정량화 될 수 있는데, 상관거리가 길어지면 식생의 균질성(homogeneity)이 커졌다는 것을 의미하고 상관거리가 작아질 경우에는 식생의 균질성이 떨어져 식생으로 덮였던 지역이 다른 용도로 개발되었다는 것을 간접적으로 보여주는 것이다. 금강유역의 경우 표 6과 같이 댐 건설 이후에 전반적으로 NDVI의 상관거리가 증가하고 있으며, 이것은 댐 건설에 따른 댐 상류유역의 개발제한으로 인한 보호가 적절히 반영된 결과로 판단된다.

3.3 잠재 증발산량의 산정

표 2에 나타낸 대청댐 상류 유역의 5개 기상관측소의 기상자료를 이용해서 식(4)의 Penman 방법으로 잠재증발산량을 산정하였으며, 티센가중법으로 대청댐 상류 유역의 평균 잠재증발산량을 산정하였다.

일반적으로 유역의 잠재증발산량은 측정된 pan 증발량의 70% 정도이다(Bras, 1990). 따라서, 산정된 잠재증발산량을 측정된 1973-1990년 기간의 pan 증발량과 표 7과 같이 비교하였으며, 잠재증발산량이 pan 증발량의 71.2% 정도로 나타났다. 이를 통해 잠재증발산량이 적절하게 산정된 것으로 판단할 수 있었다.

표 6. 댐 건설 전후의 NDVI 변화

구 분		상 관 거 리(m)		
		남 북 (a)	동 서 (b)	조화평균 {2ab/(a+b)}
댐 건설 전	1971-1980	13000	18750	15354
	1981-1990	23950	24000	23975
댐 건설 후	1991-1999	24000	25000	24490

표 7. 측정된 pan 증발량과 Penman법으로 계산된 잠재증발산량의 비교

연 도	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Penman (mm/년)	853.9	800.1	826.3	768.9	821.8	840.9	791.4	726.1	780.7	823.1
Pan (mm/년)	1281.6	1112.0	1145.7	1112.4	1192.3	1235.8	1135.7	1012.4	1085.5	1167.7
$\frac{Penman}{Pan}$ (%)	66.6	72.0	72.1	69.1	68.9	68.0	69.7	71.7	71.9	70.5
연 도	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	평균(mm/년)	
Penman (mm/년)	809.4	812.7	789.0	775.2	771.5	838.7	820.7	789.0	802.2	
Pan (mm/년)	1089.3	1120.9	1100.1	1116.4	1056.6	1189.9	1115.2	999.5	1126.1	
$\frac{Penman}{Pan}$ (%)	74.3	72.5	71.7	69.4	73.0	70.5	73.6	78.9	71.2	

표 8. 댐 건설 여부에 따른 토지이용 변화로 발생한 잠재증발산량의 비교

연 도		1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
'81~'90 증발산량 (mm/년)	0.16*	780.7	823.1	809.4	812.7	789.0	775.2	771.5	838.7	820.7	789.0
	0.17**	769.0	810.9	797.5	800.7	777.5	763.6	760.2	826.8	808.6	777.9
연 도		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	평균
'91~'99 증발산량 (mm/년)	0.15*	789.4	810.3	743.5	898.8	837.4	832.7	838.3	778.4	844.2	809.6
	0.17**	766.8	787.3	722.1	873.8	814.3	810.1	814.2	757.3	821.7	792.6

* 댐 건설에 따른 토지이용 변화로 알베도가 달라진 경우

** 댐이 건설되지 않아서 알베도의 변화가 없다고 가정한 경우

만약, 금강 유역에 대형댐이 건설되지 않았다면 대형댐 상류 유역의 토지이용 상태가 변화되지 않았을 것으로 가정할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 댐이 건설되지 않았을 경우에는 토지이용의 변화도 없었으며, 알베도의 변화도 발생하지 않을 것으로 가정 한 후, 댐 건설 전의 알베도 값을 이용해서 1981-1990년 과 1991-1999년 기간의 잠재증발산량을 산정하여 표 8과 그림 2에 나타내었다.

표 8에서 알 수 있듯이 댐이 건설되지 않았다고 가정한 경우의 잠재증발산량은 댐 건설 후의 잠재증발산 량에 비해 적게 산정되었으며, 댐 건설 후에 약 2.1% 의 잠재증발산량이 증가하고 있다. 따라서, 댐 건설에 따른 토지이용의 변화, 특히 수표면과 삼림의 증가 및 초지의 감소는 잠재증발산량의 증가에 기여하고 있음 을 알 수 있다.

4. 댐 건설에 따른 수문환경의 변화 분석

4.1 물수지 방정식의 매개변수 결정

3.3절에서 계산된 잠재증발산량과 실측된 강수량 및 유출량 자료를 이용해서 물수지 방정식 식(5)의 매개 변수 α 와 β 를 결정하였다. 강수량은 5개 기상관측소 의 월강수량 자료를 티센가중법으로 평균하여 구했으 며, 유출량은 대형댐의 유입량 자료를 사용하였다. 이 러한 자료를 이용하여 1981-1990년 기간에 대해서 매 개변수의 검정(Calibration)을 실시하였고, 1991-1999 년 기간에 대해 검증(Verification)을 실시하였다.

최적 매개변수를 결정하기 위한 적합도 검정 방법으 로는 실측치와 계산치의 체적을 비교 가능한 상대오차 RE(Relative Error)와 수문곡선의 전반적인 형태에 대해 비교 가능한 상대평균제곱오차 RRMSE

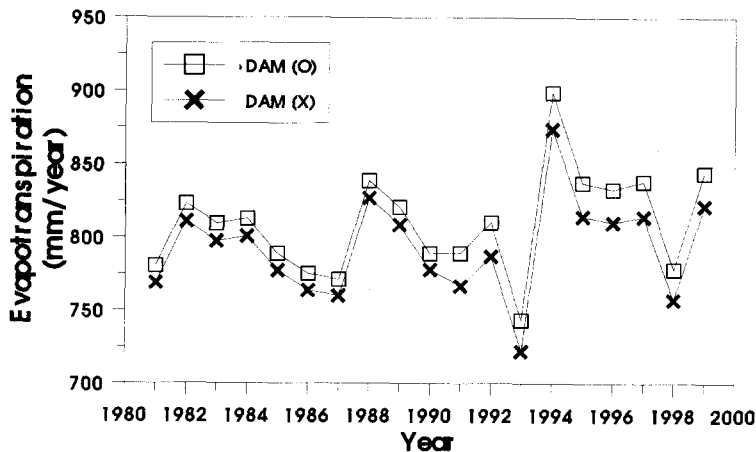


그림 2. 댐 건설 여부에 따른 토지이용 변화로 발생한 잠재증발산량의 비교

(Relative Root Mean Square Error)를 사용하였다.

1981-1990년 기간의 잠재증발산량, 강수량, 유출량 자료를 이용해서 최적 매개변수를 산정한 결과 $\alpha=0.67$, $\beta=0.55$ 로 나타났으며, 이때의 RE는 2.29%, RRMSE는 0.3131로 계산되었다. 이와 같은 검정과정을 통해 결정된 매개변수를 이용해서 모의된 유출량과 실측 유출량을 그림 3과 같이 도시하였으며, 전체적인 수문곡선의 형태를 모의 유출량과 실측 유출량이 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

선정된 매개변수를 검증하기 위하여 1991-1999년

기간의 잠재증발산량, 강수량 자료를 이용해서 유출량을 모의하였으며, 이때의 RE는 -3.04%, RRMSE는 0.3617로 검정시의 결과와 유사한 결과를 보여주었다. 모의된 유출량과 실측 유출량을 그림 4에 도시하였으며, 검정시의 결과와 마찬가지로 전체적인 수문곡선의 형태는 거의 유사함을 보여주고 있다.

따라서, 매개변수가 결정된 물수지 방정식을 이용하여 댐 건설전인 1973-1980년 기간의 유출량을 계산하였으며 이를 그림 5에 도시하였다.

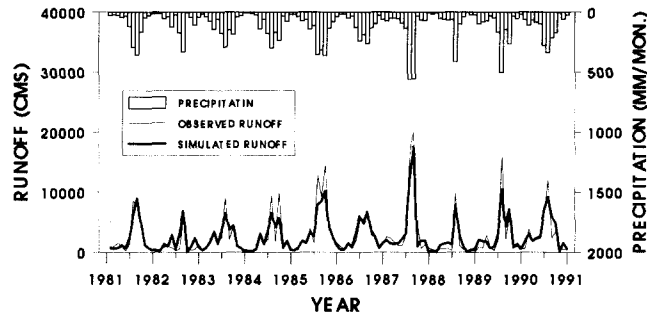


그림 3. 대청댐 지점의 실측 유출량과 모의 유출량의 비교(1981-1990년)

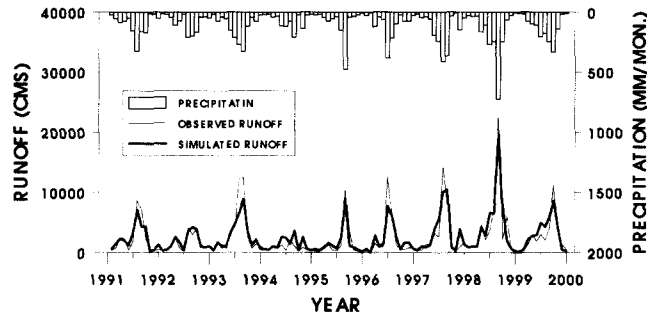


그림 4. 대청댐 지점의 실측 유출량과 모의 유출량의 비교(1991-1999년)

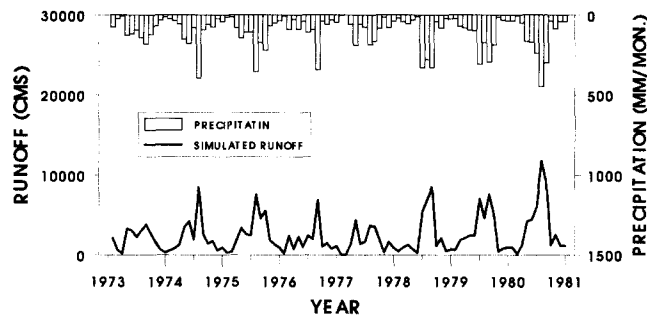


그림 5. 대청댐 지점의 모의 유출량(1973-1980년)

표 9. 댐 건설 전후의 토양 함수비 변화

구 분	댐 건설전	댐 건설후
기 간	1973-1980	1981-1999
평 균	0.6184	0.6558
표준편차	0.1180	0.1441

4.2 토양함수비의 변화

4.1절에서 결정된 물수지 방정식을 이용하여 토양함수비 S를 계산하였다. 표 9에 나타낸 댐 건설 전후의 평균 토양함수비를 살펴보면 댐 건설 전에는 0.6184에서, 댐 건설 후에는 0.6558로 증가하고 있다. 또한 표준편차도 건설 전의 0.1180에서 건설 후의 0.1441로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 댐 건설로 인해 토양함수비가 증가하며, 그 변화폭도 건설 전에 비해 넓어지고 있음을 반영하는 결과로 판단된다.

이러한 변화는 댐 건설에 따른 수표면적의 증가와 지하수위 상승으로 댐 상류 유역의 토양수분량이 증가함에 따라 나타나는 결과로서, 이는 토양 함수비와 함수관계를 가지는 증발산량과 유출량에 영향을 끼치게 되며 전반적인 수문환경의 변화를 유발하는 가장 큰 요인이 될 것으로 판단된다.

4.3 증발산량의 변화

4.2절에서 댐 건설에 따른 토양수분량의 증가를 확

인하였고, 이에 따른 수문환경의 변화를 예상한 바 있다. 따라서, 토양함수비에 따라 잠재증발산량으로부터 계산되어지는 실제증발산량의 댐 건설 전후의 변화 양상을 파악하기 위하여 표 10에 잠재 및 실제증발산량과 그 비율을 나타내었다.

표 10에서 알 수 있듯이 댐 건설 전의 연평균 실제증발산량은 605.0mm, 댐 건설 후에는 각각 620.9mm로 증가하고 있음을 보여준다. 또한, 잠재증발산과의 비율 증발율로 정의하고 계산한 결과 건설 전은 75.3%, 건설 후는 76.7%로 증가하였다.

이러한 결과는 댐 건설에 따른 토지이용 변화로 잠재증발산량이 증가하고, 토양수분량의 증가로 실제증발산량의 증가가 이어진 것을 반영하는 것으로서, 대기중으로 유입되는 수분의 증가는 안개일수의 증가를 초래하는 것이다.

이는 기존의 연구 결과(이종범, 1981; 홍성길, 1982; 남재철 등, 1995; 윤진일 등, 1997)와 일치되는 결과이다. 그러나, 기존의 연구에서는 이러한 안개일수의 증가가 단순히 수표면적의 증가로 인한 증발량의 증가

표 10. 잠재증발산량과 실제증발산량의 비교

댐 건설 전				댐 건설 후							
1973-1980년				1981-1999년							
연도	증발산량 (mm/년)		증발율 (%)	연도	증발산량 (mm/년)		증발율 (%)	연도	증발산량 (mm/년)		증발율 (%)
	잠재	실제			잠재	실제			잠재	실제	
1973	853.9	626.8	73.4	1981	780.7	619.4	79.3	1991	789.4	613.6	77.7
1974	800.1	601.7	75.2	1982	823.1	578.4	70.3	1992	810.2	539.6	66.6
1975	826.3	619.8	75.0	1983	809.4	611.6	75.6	1993	743.5	585.6	78.8
1976	768.9	561.3	73.0	1984	812.7	592.5	72.9	1994	898.8	597.7	66.5
1977	821.8	559.7	68.1	1985	789.0	638.1	80.9	1995	837.4	512.4	61.2
1978	840.9	597.8	71.1	1986	775.2	668.3	86.2	1996	832.7	623.4	74.9
1979	791.4	643.0	81.2	1987	771.5	653.4	84.7	1997	838.3	654.4	78.1
1980	726.1	630.1	86.8	1988	838.7	628.9	75.0	1998	778.4	681.7	87.6
				1989	820.7	612.6	74.7	1999	844.2	694.4	82.3
평균	803.7	605.0	75.3	1990	789.1	691.5	87.6	평균	809.6	620.9	76.7

때문에 발생하는 것으로 분석되었지만, 본 연구에서는 수표면적의 증가뿐만 아니라 댐 상류 지역의 이용 제한으로 인한 삼림의 증가 및 초지의 감소가 잠재증발산량의 증가를 초래하고, 수표면적 증가에 따른 지하수위의 상승으로 토양수분량이 증가하며 이것이 실제증발산량의 증가로 이어져서 안개일수의 증가가 야기되는 것으로 분석되었다.

4.4 유출율의 변화

4.3절에는 댐 건설에 따른 토양수분량의 증가가 실제증발산량의 증가로 이어짐을 확인하였으며, 본 절에서는 유출량의 변화에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 분석을 실시하였다.

이를 위해 4.1절에서 결정된 물수지 방정식을 이용하여 댐 건설 전후의 유출량을 산정하였으며, 유출율을 계산하여 표 11에 나타내었다. 여기서, 유출율은 강수량에 대한 유출량의 비율 의미한다.

표 11에서 알 수 있듯이 댐 건설 전의 연평균 유출율은 50.3%이며, 댐 건설 후에는 51.5%로 약간 증가하는 것으로 나타났는데, 이것은 댐 건설에 따른 토양함수비의 증가로 인해 강수량의 침투가 줄어들어서 직접 유출량이 증가하였기 때문일 것이다.

하지만, 4.3절에서 알 수 있듯이 토양함수비의 증가는 증발산량의 증가도 초래하게 되므로 장기적인 관점에서 볼 때, 유역의 침투량 감소와 증발산량 증가 효과가 서로 상쇄됨으로써 아주 큰 유출율의 증가로까지 이어지지는 않는 사실을 보여주는 것이라 할 수 있다.

그러나, 큰 차이는 아닐지라도 댐 건설로 인해 댐 상류 유역의 유출율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 댐 건설에 따른 수문환경의 변화를 살펴보기 위해서, 간단한 물수지 방정식을 이용한 분석을 실시하였다. 금강유역의 대청댐 상류 지역을 대상으로 하였으며, 댐 건설 전후의 토지이용, 알베도, 식생, 잠재증발산량, 토양수분량, 실제증발산량, 유출율 등을 분석하여 댐 건설에 따른 수문환경의 변화 여부 및 이러한 수문환경의 변화에 영향을 끼치는 요인들에 대해 파악하였다. 본 분석의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 댐 건설에 따른 토지이용은 인공호수의 생성으로 인한 수표면적의 증가와 댐 상류 유역의 이용제한으로 인한 삼림의 증가 및 초지의 감소가 두드러졌다.
- 2) 삼림의 증가와 초지의 감소로 알베도가 감소하였으며, 이로 인해 알베도 변화가 없다고 가정했을 경우에 비해 잠재증발산량이 증가하였다.
- 3) NDVI의 상관거리를 이용한 식생의 분석 결과, 댐 건설로 인해 식생의 보호가 적절히 이루어지고 있음을 알 수 있었다.
- 4) 댐 건설에 따른 수표면적의 증가는 지하수위의 상승으로 이어지며, 이로 인해 토양수분량이 증가하는 것으로 분석되었다.
- 5) 알베도 감소로 인한 잠재증발산량의 증가 및 토양수분량의 증가로 인해 실제증발산량이 증가하였으며, 이는 대기 중의 수분량의 공급이 증가하는 것으로써

표 11. 댐 건설 전후의 유출율 비교

댐 건설전				댐 건설후							
1973-1980년				1981-1990년				1991-1999년			
연도	강수량 (mm/년)	유출량 (mm/년)	유출율 (%)	연도	강수량 (mm/년)	유출량 (mm/년)	유출율 (%)	연도	강수량 (mm/년)	유출량 (mm/년)	유출율 (%)
1973	1001.2	492.3	49.2	1981	1172.3	607.6	51.8	1991	1178.1	597.2	50.7
1974	1208.9	584.4	48.3	1982	966.9	439.1	45.4	1992	971.9	441.5	45.4
1975	1369.7	681.6	49.8	1983	1203.1	599.2	49.8	1993	1403.9	739.7	52.7
1976	978.5	463.4	47.4	1984	1242.7	605.8	48.7	1994	809.9	356.0	44.0
1977	951.8	435.2	45.7	1985	1721.7	947.1	55.0	1995	980.8	402.7	41.1
1978	1263.7	603.3	47.7	1986	1238.2	686.0	55.4	1996	1153.5	555.6	48.2
1979	1415.4	750.0	53.0	1987	1746.7	980.8	56.1	1997	1598.3	835.8	52.3
1980	1617.3	920.6	56.9	1988	859.7	400.3	46.6	1998	1944.8	1117.2	57.4
				1989	1511.5	745.0	49.3	1999	1433.1	770.2	53.7
평균	1225.8	616.4	50.3	1990	1515.2	863.2	57.0	평균	1297.5	667.9	51.5

안개일수의 증가를 초래하게 된다. 또한 안개일수의 증가가 단순히 수표면적의 증가에 기인하는 것이 아니라, 삼림의 증가와 초지의 감소 및 토양수분량의 증가에 큰 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었다.

6) 댐 건설 후의 유출율은 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이는 토양수분량의 증가로 인한 침투량의 감소와 실제증발산량의 증가가 서로 상쇄되면서 발생한 결과로 판단된다.

7) 이상의 분석을 통해 댐 건설에 따른 수문환경의 변화를 정량적으로 파악할 수 있었다.

참 고 문 헌

기상청(1966-1999). 기상연보, 과학기술부.
 남재철, 신만용, 윤진일(1995). "매시기상자료에 의한 안동지역 인공호 주변 안개발생 판별." 한국기상학회지, 한국기상학회, 제31권, 제4호, pp. 393~398.
 신사철(1996). "인공위성 자료에 근거한 한반도 물수지 분포의 추정." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제29권, 제5호, pp. 203~214.
 이재형, 김양일, 황만하, 정재성(1994). "금강 하구호의 월 유입량 추정에 관한 연구." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제27권, 제3호, pp. 83~93.
 이종범(1981). "춘천지방의 인공호에 의한 안개 및 운량의 변화." 한국기상학회지, 한국기상학회, 제17권, 제1호, pp. 18~26.
 이진원, 김형섭, 우효섭(1993). "댐 건설로 인한 5대 수계 본류의 유황변화 분석." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제13권, 제3호, pp. 79~91.
 윤용남(1998). 공업수문학, 청문각, pp. 249~253.
 윤용남, 강병석, 김웅태, 김재형, 고익환(1998a). "댐 건설전후 유역의 장기유출특성변화의 분석: II. 모형의 매개변수 산정을 통한 유역 장기유출특성 변화 분석." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제18권, 제II-5호, pp. 461~470.
 윤용남, 유철상, 안재현, 양인태, 고덕구(1998b). "댐 건설전후 유역의 장기유출특성변화의 분석: I. GIS를 이용한 NWS-PC 모형의 매개변수 추정." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제18권, 제II-5호, pp. 449~459.
 윤진일, 황규홍, 정현향, 신만용, 임준택, 신진철(1997). "주암 다목적댐 건설에 따른 국지기후 변화가 농작물 생산성에 미치는 영향." 한국기상

학회지, 한국기상학회, 제33권, 제3호, pp. 409~427.
 홍성길(1982). "안동댐 건설이후 안동지방의 안개 증가." 한국기상학회지, 한국기상학회, 제18권, 제2호, pp. 26~32.
 한국수자원공사(1992). 전국 하천조사서.
 Blaney, H.F. and Criddle, W.D.(1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*, U.S. Department of Agriculture Soil Conservations Service. Technical Document No. 96.
 Bras, R.L.(1990). *Hydrology: An introduction to hydrologic science*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
 Brutsaert, W. and Stricker, H.(1979). "An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 443~450.
 Budyko, M.(1956). *The Heat Balance of the Earth's Surface*, Leningrad, USSR.
 Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W.(1988). *Applied Hydrology*, Singapore, N.Y.: McGraw-Hill Book Co.
 Kaczmarek, Z.(1990). *On the sensitivity of runoff to climate change*, Rep. No. WP-90-58, IIASA, Laxenburg, Austria.
 Kim, C.P. and Entekhabi, D.(1997). "Examination of two methods of estimating regional evaporation using a coupled mixed layer and land surface model." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 2109~2116.
 Monteith, J.L.(1965). "Evaporation and environment." *Symp. Soc. Exp. Biol.*, 19, pp. 205~234.
 Morton, F.I.(1965). "Potential evaporation and river basin evaporation." *J. of Hyraul. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 91, pp. 67~97.
 Morton, F.I.(1976). "Climatological estimates of evapotranspiration." *J. of Hyraul. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 102, pp. 275~291.

- Morton, F.I.(1983). "Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology." *J. of Hydrology*, 66, pp. 1~76.
- Penman, H.L.(1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. Roy. Soc.*, London, 193, pp. 120~145.
- Philip, J.R.(1957). "Evaporation, moisture and heat fields in the soil." *J. of Meteorol.*, 14, pp. 354~366.
- Pierce, L.T.(1958). "Estimating seasonal and short term fluctuations in evapotranspiration from meadow crops." *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 39, pp. 73~78.
- Ponce, V.M., Lohani, A.K. and Huston, P.T.(1997). "Surface albedo and water resources: Hydroclimatological impact of human activities." *J. of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 2, No. 4, pp. 197~203.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J.(1972). "On the assesment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, 100, pp. 81~92.
- Rodriguez-Iturbe, I., Entekhabi, D. and Bras, R.L.(1991). "Nonlinear dynamics of soil moisture at climate scales: 1. Stochastic analysis." *Water Resource Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1899~1906.
- Thornthwaite, C.W.(1948). "An Approach Toward a Rational Classification of Climate." *Geograph. Rev.*, 38, pp. 55~94.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R.(1955). *The water budget and its use in irrigation, in Water*, the Yearbook of Agriculture, U.S. Dept. of Agric., Washington, D.C., pp. 346~358.
- Van Bavel, C.H.M.(1966). "Potential evaporation : The combination concept and its experimental verification." *Water Resource Research*, 2, pp. 455~467.
- Yates, D.N. and Strzepek, M.(1998). "Modeling the Nile basin under climate change." *J. of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 98~108.

(논문번호:00-060/접수:2000.09.14/심사완료:2001.04.18)