

## 기후학적 물수지에 의한 금강유역의 습윤 / 건조 상태 분석

김주철 · 이상진<sup>†</sup>

한국수자원공사 Kwater연구원

### Analysis of Wetness/Dryness in Geum River Basin based on Climatic Water Balance

Joo Cheol Kim · Sang Jin Lee<sup>†</sup>

K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

(Received 16 September 2009, Revised 8 January 2010, Accepted 13 January 2010)

#### Abstract

Evapotranspiration and rainfall-runoff are the major components of hydrological cycle and thereby the changes of them can directly affect the wetness/dryness or runoff characteristics of basins. In this study the wetness/dryness in Geum river basin are classified by dint of cumulative probability density function of monthly moisture index and the long term changes of them are analyzed based on climatic water balance concept. The drought events in Geum river basin are selected through evaluation of monthly moisture index and the various hydrological properties of them are investigated in detail. Also the trends of time-series of climatic water balance components are examined by Seasonal Kendall test and the variability of hydrological cycle in Geum river basin during the recent decade is inquired. It is judged that the results of this study can be contributed to establishment of the counter plan against the future drought events as the fundamental information.

**keywords** : Climatic water balance, Drought event, Moisture index, Seasonal Kendall test

### 1. 서론

최근 지구온난화(global warming) 및 기후변화(climate change)에 관련된 사안들이 수자원관리 분야에서 주요한 이슈로서 등장하고 있다(김광섭, 2008; 배덕효와 정일원, 2008). 이들은 주로 평균기온의 상승이나 강우패턴의 변동 등에 주목하여 다루어지고 있는데 IPCC(기후변화에 관한 정부간협의체)는 4차 기후변화에 관한 평가보고서(IPCC, 2008)에서 지난 세기 동안 전 지구 평균 기온은 약 0.74°C 상승하였으며 최근 12년(1995~2006) 중 11년이 1900년 이후 지구 평균기온이 가장 높은 해로 관측되었다고 보고하고 있다.

이러한 경향을 수문학적 관점에서 유추해 본다면 물 순환과정 내 각 성분별 거동특성의 변화로 해석할 수 있을 것이다. 예를 들어 평균기온의 상승은 중요한 수문기상학적 성분 중의 하나인 증발산량의 변화를 초래할 수 있다(윤용남, 1996). 증발산현상은 물 순환과정의 한 부분을 구성하는 요소로서 이의 변화는 유역의 습윤/건조 상태나 유출특성에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 또한 이러한 변화들은 연쇄적으로 나머지 물 순환과정 성분들에 영향을 주게 되어 결국 물 순환과정 전반에 걸쳐 과거와는 다른 각종 수문기상학적 특성들을 양산하게 되는 것이다. 우리나라의 경우 강수량은 증가하는 경향을 보이지만 강수일수가 줄어들고 있어

들고 있어 홍수와 가뭄발생 가능성이 동시에 증가하고 있음으로 이해할 수 있다. 이와 관련하여 배덕효와 정일원(2008)은 1960년대 이후 극심한 가뭄의 빈도가 증가하고 있으며 1990년대 이후 호우의 발생빈도와 강도가 과거에 비해 증가하는 경향을 보이고 있음을 지적하고 있다. 또한 과거에 비하여 그 심도나 빈도가 증가추세에 있는 봄 가뭄이나 국지성 호우(혹은 돌발홍수)에 의한 재난 발생 등이 이러한 예로서 제시되고 있음을 각종 문헌으로부터 확인할 수 있다(신현석 등, 2004; 이주현 등, 2006).

상기한 사안들은 유역단위의 수자원관리 차원에서 가용 수자원의 시/공간적 편재(偏在)현상의 심화를 암시하는 것으로 현저하게 증가한 각종 물 수요에 대하여 장래 물 공급환경이 어려워질 것임을 시사하고 있다. 따라서 이에 적절하게 대응하기 위하여 유역의 습윤/건조 상태에 대한 지속적인 모니터링 방안이나 이를 바탕으로 한 효율적인 수자원관리 전략의 수립이 절실히 요구된다 할 수 있다.

유역의 특성을 파악하고 발생할 수 있는 수자원의 양적 불균형에 따른 문제점을 탐지하여 그에 대비하기 위해서는 무엇보다도 신속한 정보의 제공이 우선되어야 한다. 또한 이러한 정보를 이용하여 유역의 습윤/건조 상황을 모니터링하거나 예측하기 위해서는 즉각적이고 연속적인 정보의 수집이 요구된다. 근래 GIS 및 R/S를 기반으로 한 지리정보처리 기술의 발달은 광범위한 유역규모의 습윤/건조 상태에 관한 정보의 수집을 가능하게 하고 있다. 이와 관련하여 대표적인 국내 연구사례로서 신사철 등(2006, 2008)은

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
sjlee@kwater.or.kr

위성영상자료로부터 추출한 식생정보(NDVI)를 기온정보와 결합하여 증발산량을 추정할 수 있는 간략법을 제안하고 기후학적 물수지(climatic water balance)에 대한 개념(Thornthwaite, 1948)을 기반으로 강우에 의한 물 공급과 기후학적 물 수요에 대한 비교를 통해 유역의 습윤/건조 상태를 파악함으로써 유역의 반응을 감시할 수 있는 기법을 개발한 바 있다. 유역차원에서 정보는 비교적 넓은 지역을 대상으로 하므로 지점에서의 정보수집방법보다는 공간적 기법 및 R/S에 의한 방법을 이용하는 것이 공간적/직적 불균형이 없는 연속적인 자료를 수집하는 효과적인 방법이다. 따라서 이들의 시도는 대규모 유역관리 측면에서 유역의 습윤/건조 상태에 관한 정량적인 정보를 제공할 수 있는 시스템 개발을 위한 기초 연구로서 평가할 수 있을 것이다.

신사철 등(2008)은 전술한 습윤/건조 모니터링 시스템의 경우 비교적 장기간에 걸쳐 광범위한 지역을 대상으로 발생하는 건조현상, 즉 가뭄사상의 감시에 효율적임을 제시한 바 있다. 가뭄은 여러 가지 면에서 일반 자연재해들과는 다른 특성을 지니고 있다. 예를 들면 가뭄에 의한 영향 및 피해상황은 상당 기간 동안 완만히 누적되어 나타나게 되고 가뭄이 해갈된 후에도 수개월 또는 수년 동안 파급효과가 나타날 수 있기 때문에 가뭄의 시작과 종료를 쉽게 결정하기 어렵다. 이러한 이유로 인하여 가뭄을 잠행(潛行)현상이라고도 하며 이는 기상 및 수자원 전문가와 가뭄관리 담당자들이 어느 시점에 가뭄을 선언하고 종료할 것인가의 결정을 어렵게 하는 요인이 되고 있다(한국수자원공사, 2006).

본 연구에서는 전술한 기후학적 물수지 방법을 금강유역에 적용하여 시간에 따른 습윤/건조 상태의 변화를 파악하고 이를 기반으로 가뭄사상(시점과 종점 그리고 지속기간)을 선별하여 해당 사상들에 대한 각종 특성을 분석해 보고자 한다. 또한 주요한 기후학적 물수지 성분 시계열에 대한 경향성(trend) 분석을 수행하여 대상유역에서 전개되고 있는 물 순환과정의 변동성을 파악하고 이를 기반으로 최근 빈번하게 발생하고 있는 가뭄사상들에 대한 원인을 유추해 보고자 한다. 경향성 시험법으로는 Seasonal Kendall 시험법을 선정하였으며 실제 분석에는 USGS에서 제공하는 Kendall.exe code(Helsel et al., 2006)를 적용한다. 본 연구의 대상기간은 1998년부터 2007년까지 10년간으로 전술한 IPCC의 4차 기후변화에 관한 평가보고서(IPCC, 2008)에서 언급한 기간과 대부분 일치하는 바 이러한 분석은 향후 유역의 가뭄발생의 예견이나 가뭄발생에 따른 대처방안을 수립하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이며 이에 따른 유역의 습윤/건조 상태의 변동성 파악은 기후변화 및 지구온난화에 관한 연구 분야에 있어 의미 있는 수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 기후학적 물수지

기후학적 물수지에 대한 개념은 기후의 분류를 위하여 Thornthwaite(1948)에 의하여 개발된 이래 다양한 수문기상

학적 문제에 대한 정량적 정보의 획득 수단으로 응용되어 왔다(Legates and Mather, 1992; Tateish and Ahn, 1996). Fig. 1은 본 연구에서 적용한 기후학적 물수지 개념에 대한 모식도로서 실제 물수지 산정을 위한 입력 자료로는 강우분포(P), 실제증발산량분포(E), 잠재증발산량분포(PE)가 필요하며 임의지점에서의 강우량(공급량)과 증발산량(수요량) 사이의 대소 관계에 의해 토양수분(Sm), 과잉수분량(S) 및 부족수분량(D)을 결정하게 된다(신사철 등, 2008). 여기서 과잉수분량은 식물에 의한 수요량 이상의 수분 그리고 부족수분량은 기후학적 수요량과 실제공급량 사이의 차로 정의된다.

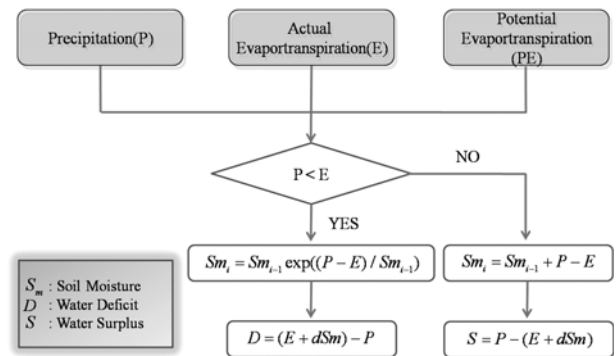


Fig. 1. Schematic diagram of climatic water balance concept.

Fig. 1의 과정을 통하여 산정되는 과잉수분량과 부족수분량을 잠재증발산량과 결합하여 Thornthwaite(1948)은 다음과 같은 습윤지표를 제안하였다.

$$Im_i = \frac{100(S_i - 0.6D_i)}{PE_i} \quad (1)$$

여기서  $Im_i$ 는  $i$ 월의 습윤 지표,  $S_i$ 는  $i$ 월의 과잉수분량(mm),  $D_i$ 는  $i$ 월의 부족수분량(mm) 그리고  $PE_i$ 는  $i$ 월의 잠재증발산량(mm)을 나타낸다. 식 (1)의 습윤지표는 부족수분량이 발생하는 경우 음(-)의 값을 갖게 되며 물 부족현상과 관련이 있는 것으로 판단할 수 있다. 또한 과잉수분량이 발생하는 경우 습윤지표는 양(+)의 값을 갖게 되며 이는 지표면 유출과 관련된다.

본 연구에서는 식 (1)로부터 산정되는 월별 습윤지표의 누가확률밀도함수(cumulative density function, CDF)  $P(x)$ 를 이용하여 유역의 습윤/건조 상태를 분류하여 보았다. 여기서 누가확률이란 어떤 사상이 특정한 크기의 변량보다 작거나 같은 변수를 가질 확률을 의미하는 것으로 일정 기간 동안 수집된 표본 집단에 대한 도수분포도로부터 추정할 수 있다. 하지만 도수분포도의 형상은 적용된 계급구간의 크기나 개수에 크게 영향을 받아 모집단과 다른 특성을 나타낼 수 있음이 잘 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 특정한 도수분포도의 작성 과정을 거치지 않고 월별 습윤지표의 크기에 따른 순위(rank)를 자료의 개수로 나누어 누가확률을 직접 추정할 수 있도록 하였다(Haan, 2002). 이에

따른 실제 습윤/건조 상태의 분류 과정은 다음과 같다. 우선 기왕 최대치와 최소치에 따라 극한습윤(Extreme Wet, EW)과 극한건조(Extreme Dry, ED) 조건을 정의하고 양자 사이의 구간을 누가확률  $P(x)$ 에 따라 습윤( $0.666 < P(x)$ , Wet), 정상( $0.333 < P(x) < 0.666$ , Normal), 건조( $P(x) < 0.333$ , Dry)로 3등분 하였다. 다음으로 각 구간을 누가확률의 등간격에 따라 다시 3등분 하여 총 9개의 습윤/건조 상태를 설정하였다. Table 1은 상기한 과정에 따라 설정한 습윤/건조 상태의 분류기준으로서 건조와 습윤은 각각 강(Strong), 중(Mild), 약(Weak) 그리고 정상은 건조정상(Dry Normal, DN), 정상(Normal, N), 습윤정상(Wet Normal, WN)으로 세분화하여 보았다. 이로부터 식 (1)을 통하여 산정된 습윤 지표를 Table 1의 기준에 따라 분류하여 유역의 습윤/건조 상태를 파악할 수 있을 것이며 만약 고려하는 습윤 지표가 건조의 범주에 속할 경우 대상유역에서는 가뭄사상이 발생할 수 있는 것으로 예상할 수 있다.

**Table 1.** Classification criteria of Wet/Dry state by  $P(x)$

Wet / Dry condition	Symbol	$P(x)$	
		Lower limit	Upper limit
Dry	Strong dry	SD	0.111
	Mild dry	MD	0.222
	Weak dry	WD	0.333
Normal	Dry normal	DN	0.444
	Normal	N	0.555
	Wet normal	WN	0.666
Wet	Weak wet	WW	0.777
	Mild wet	MW	0.888
	Strong wet	SW	0.888

**2.2. Seasonal Kendall 경향성 시험**

본 연구에서는 기후학적 물수지와 관련된 각종 시계열 자료들(예를 들면 습윤지표)에 대한 경향성 분석을 위하여 Mann-Kendall 시험법의 발전한 형태 중의 하나인 Seasonal Kendall 시험법(Hirsch et al., 1982)을 선정하였다. 실제 분석에는 USGS에서 제공하는 Kendall.exe code(Hesel et al, 2006)를 적용하였으며 이에 대한 이론적 배경을 살펴보면 다음과 같다; 임의 시계열  $X_k(k=1,2,\dots,n)$ 에 대한 Mann-Kendall 통계치는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Haan, 2002).

$$T = \sum_{j < i} sign(X_i - X_j); 1 \leq j < i \leq n \tag{2}$$

여기서 우변의  $sign(\cdot)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$sign(\Delta X) = \begin{cases} 1 & ; \Delta X > 0 \\ 0 & ; \Delta X = 0 \\ -1 & ; \Delta X < 0 \end{cases} \tag{3}$$

만약 시계열자료가 동일한 값이 존재하지 않고 경향성을 가지지 않는다면 식 (2)의 검정 통계치는 점근적으로 정규화된 분포를 형성할 것이며  $T$ 의 기본 통계치인 평균과 분

산은 다음과 같다.

$$E(T) = 0; Var(T) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{4}$$

반응변수의 계절성을 고려한 Seasonal Kendall 시험은 우선 각 계절에 대응하는 하위 자료로 분리하여 다음과 같이 계산하게 된다(김광섭, 2008; 김광섭과 임태경, 2006).

$$T_j = \sum_{k < l} sign(X_{lj} - X_{kj}) \tag{5}$$

여기서  $T_j$ 는 특정계절(혹은 월)에 대응하는 Mann-Kendall 통계치이며 이것을 전체 연(年)에 걸쳐 합하여 다음과 같은 통계치를 얻는다.

$$S = \sum_j T_j \tag{6}$$

여기서  $S$ 는 평균이 0이고 분산이 다음과 같은 정규분포를 가진다.

$$Var(S) = \sum_j Var(T_j) + \sum_{\substack{j,g=1 \\ g \neq j}} Cov(T_j T_g) \tag{7}$$

식 (7) 우변의 첫 번째 항  $Var(T_j)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$Var(T_j) = \frac{n_j(n_j-1)(2n_j+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \tag{8}$$

여기서  $n_j$ 는  $j$ 월에 대한 결측치를 제외한 관측치의 수,  $m$ 은 동일한 값을 가지는 group의 수,  $t_i$ 는 동일한 값을 가지는 group의 크기이다. 또한 식 (7) 우변의 두 번째 항  $Cov(T_j T_g)$ 는 다음과 같다.

$$Cov(T_j T_g) = \frac{S_{jg} + 4 \sum_{m=1}^n R_{mj} R_{mg} - n(n_j+1)(n_g+1)}{3} \tag{9}$$

식 (9)에서  $n_j, n_g$ 는 각각  $j$ 월 및  $g$ 월에 대한 결측치를 제외한 관측치의 수이다. 또한  $S_{jg}$  및  $R_{mj}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_{jg} = \sum_{m < n} sign\{(X_{nj} - X_{mj})(X_{ng} - X_{mg})\} \tag{10}$$

$$R_{mj} = \frac{n_j + 1 + \sum_{k=1}^n sign(X_{mj} - X_{kj})}{2} \tag{11}$$

여기서  $R$ 은 관측치에 대응하는 행렬로서 식 (11)은  $j$ 월의  $m$ 번째 요소를 나타낸다. 만약  $X_{mj}$  또는  $X_{kj}$ 가 결측되었다면  $sign(X_{mj} - X_{kj})$ 는 0으로 계산하고 결측치에 대한 중간 서열  $(n_j + 1)/2$ 를 채택한다.

2.3. 대상유역 및 적용자료

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 금강유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 2). 주요한 입력 자료로서 강우자료의 경우 선행연구(류경식 등, 2007) 과정에서 금강유역에 대하여 구축된 장기유출모형인 RRFs(Rainfall Runoff

Forecasting System)의 입력 자료를 이용하였고 위성영상자료로는 NOAA/AVHRR 자료를 적용하였다. 습윤지표의 산정에 관련된 모든 변수들(예를 들면 과잉수분량 및 부족수분량 등)의 계산은 1100×1100 m의 격자를 기반으로 하였으며 적용기간은 1998년 3월부터 2007년 12월까지 총 118개월을 대상으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 습윤지표에 의한 가뭄사상의 선별

본 연구의 대상기간에 대하여 월별 습윤지표를 식 (1)을 이용하여 산정하고 전술한 기준(Table 1)에 따라 Table 2와 같이 분류하여 보았다. Fig. 3은 산정된 월별 습윤지표를 시계열 형태로 도시해 본 것으로 그림 중앙의 세 직선은 각각 약한 건조(WD), 건조(D), 강한 건조(SD)의 상한계를 의미한다. 이상의 분류과정에서 총 39개의 월별 습윤지표가 건조 상태로 나타났으며 Fig. 3에서 보는 바와 같이 건조 상태의 지속양상에 따라 총 11개의 가뭄사상(원으로 표시)을 선별할 수 있었다. 여기서 주목할 만한 사항은 2001년에 대한 산정결과로서 하절기(6, 7, 8월) 및 일부기간(10월)을 제외한 대부분의 월별 습윤지표가 건조 상태에 해당함을 확인할 수 있다. 실제로 2001년은 대표적인 갈수년(渴水年)으로 파악되며 2000년 이후 거의 매년 동절기와 춘절기에 건조 상태가 나타나는 것으로 보여 금강유역의 경우 봄 가뭄의 발생 빈도가 전반적으로 증가추세에 있는 것으로 분석된다. 금강유역의 월별 습윤지표와 기존 연구에서 개발된 RRFs 모형(류경식 등, 2007)의 토양수분상태를 나타내는 Soil Moisture Index(이하 SMI)를 Fig. 4와 같이 동일한 시간 축 위에 도시하여 보았다. 여기서 습윤지표와 SMI는 비교적 유사한 거동특성을 나타냄을 확인할 수 있다. 하지만 전절에서 선별된 대부분의 가뭄사상들에 대한 SMI값들이 상당히 크게 나타나고 양자 사이의 상관계수 역시 0.5 정도로 낮게 산정되어 보다 정량적인 분석을 위해서는 추후 자료가 더욱 축적되어야 할 것으로 판단된다.

3.2. 가뭄사상별 주요 특성

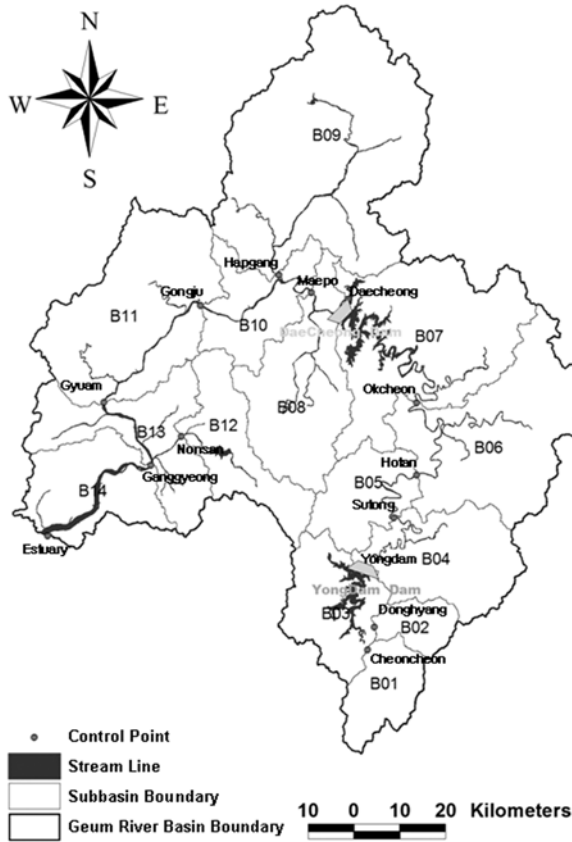


Fig. 2. Drainage map of Geum river basin.

Table 2. Classification of monthly Wet / Dry state

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
1		DN	DN	D	SD	N	SD	SD	WD	SD
2		DN	D	D	SD	WW	WD	D	WD	SD
3	DN	WN	D	SD	SD	WD	SD	D	D	WD
4	SW	WW	D	D	WN	WW	WD	WD	DN	D
5	WW	WW	WD	D	WN	WN	N	DN	N	DN
6	SW	WW	WN	WN	DN	W	W	WN	N	N
7	W	WW	WW	WN	WN	SW	W	W	SW	WW
8	SW	W	SW	N	SW	W	W	SW	WN	W
9	SW	SW	SW	WD	WN	W	W	W	DN	SW
10	WN	SW	N	DN	WN	N	WD	WW	D	N
11	WW	N	WW	SD	WW	W	N	DN	D	WD
12	N	N	DN	SD	SW	WD	DN	SD	SD	WD

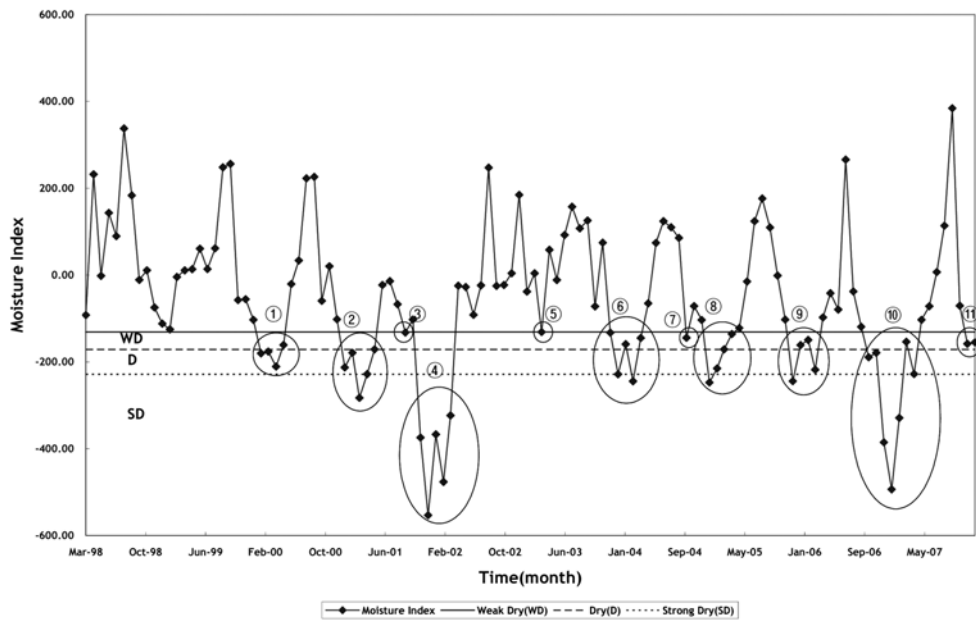


Fig. 3. Monthly moisture index time series of Geum river basin.

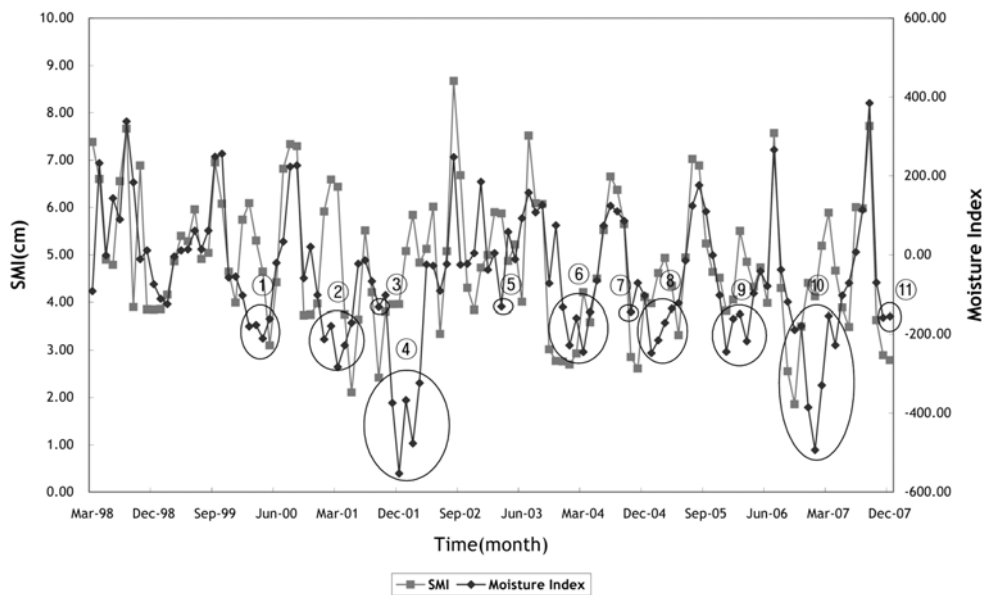


Fig. 4. Monthly moisture index & SMI time series of Geum river basin.

전절에서 선정된 11개 가뭄사상들에 대한 전반적인 특성을 Table 3과 같이 정리하여 보았다. 여기서 5월의 습윤지표는 해당기간에 대한 월별 습윤지표의 평균값을 나타내고 7, 8월의 저수율은 금강유역 내 2개 다목적 댐의 평균저수율을 의미한다. 6월의 건조 상태는 5월의 습윤지표를 Table 1의 기준에 따라 재분류해 본 것으로 이로부터 2개 사상(④, ⑩번 사상)은 강한 건조, 5개 사상(①, ②, ⑥, ⑧, ⑨번 사상)은 건조, 4개 사상(③, ⑤, ⑦, ⑪번 사상)은 약한 건조의 범주에 해당하는 것으로 나타났다.

건조 상태별 지속기간의 경우 1) 강한 건조 : 5~7개월, 2) 건조 : 4~5개월, 3) 약한 건조 : 1~2개월로 건조 상태의 지속기간이 길수록 가뭄심도가 커지는 경향을 확인할 수

있다. 단 약한 건조의 범주에 포함되는 ⑪번 사상은 본 연구의 대상기간에 포함되지 않은 2008년 동절기 및 춘절기 가뭄사상의 일부로서 이후 세부 분석에서는 제외하였다. 이에 따라 금강유역의 경우 약한 건조 상태의 가뭄사상은 지속기간이 1개월을 초과하지 않는 것으로 판단된다.

건조 상태별 평균저수율은 대청댐의 경우 1) 강한 건조 : 35~45%, 2) 건조 : 45~55% 3) 약한 건조 : 55~60% 정도로 나타나 가뭄심도에 따라 저수율이 낮아지는 비교적 일관성 있는 경향을 찾을 수 있다. 그러나 ③번 사상의 경우 약한 건조의 범주에 포함됨에도 불구하고 37%의 낮은 저수율을 보이는 바 이는 2001년 전반에 걸친 건조 현상에 종속적인 결과로서, 연초에 발생한 ②번 가뭄사상이 하절

**Table 3.** Main characteristics of the selected drought events

No.	Start	End	Duration (month)	Moisture index	Wet / Dry state	Storage ratio (%)	
						Yongdam	Daecheong
①	2000. 2.	2000. 5.	4	-182.06	D		0.54
②	2001. 1.	2001. 5.	5	-214.74	D	0.07	0.46
③	2001. 9.	2001. 9.	1	-132.14	WD	0.26	0.37
④	2001.11.	2002. 3.	5	-418.79	SD	0.21	0.40
⑤	2003. 3.	2003. 3.	1	-131.17	WD	0.50	0.60
⑥	2003.12.	2004. 4.	5	-181.89	D	0.45	0.54
⑦	2004.10.	2004.10.	1	-144.33	WD	0.69	0.61
⑧	2005. 1.	2005. 4.	4	-192.38	D	0.43	0.49
⑨	2005.12.	2006. 3.	4	-193.22	D	0.38	0.53
⑩	2006.10.	2007. 4.	7	-279.64	SD	0.49	0.50
⑪	2007.11.	2007.12	2	-156.56	WD	0.70	0.69

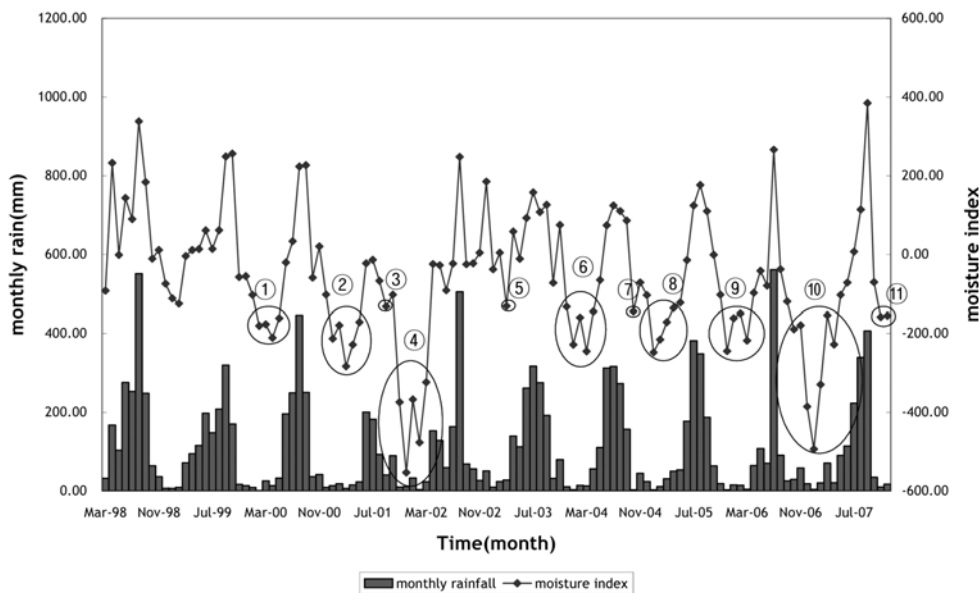
기의 부족한 강우로 인해 충분히 해소되지 않았기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 용담댐의 경우 대청댐과는 다소 상이한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 담수시점부터 현재까지의 운영기간이 충분히 길지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 월별 습윤지표와 강우량을 동일한 시간 축 위에 도시한 것으로 매년 6~9월의 우기 4개월을 제외하고는 가뭄사상들이 빈번하게 발생함을 확인할 수 있다.

월별 습윤지표와 강우량 사이의 상관정도를 파악하기 위하여 각 가뭄사상들을 중심으로 연중강우량을 6~9월, 10~12월, 1~5월의 기간으로 구분하여 분석하여 보았다. Table 4는 각 가뭄사상들에 대한 평균 습윤지표와 기간별 누가강우량을 건조 상태의 범주에 따라 정리해 본 것으로 마지막 행은 본 연구의 대상기간에 대한 각 누가강우량의 평균을 나타낸다. 두드러진 특징으로 강한 건조와 건조 상태의 가뭄사상들은 각각 6~9월 및 10~12월의 누가강우량의 규모에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 6~9월의 누가강우량이 예년평균 이하일 경우 10~12월의 누가강우량이 예년수

준에 해당함에도 불구하고 강한 건조에 해당하는 가뭄이 발생하고 있으며 반대로 10~12월의 누가강우량이 예년평균 이하일 경우 6~9월의 누가강우량이 예년수준에 해당함에도 불구하고 건조에 해당하는 가뭄이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 상기한 두 기간의 누가강우량에 대한 지속적인 모니터링은 가뭄의 예측에 있어 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 약한 건조의 경우 뚜렷한 경향을 찾을 수 없었다.

상기한 금강유역의 가뭄사상별 분석 결과를 정리해 보면 다음과 같다. 우선 약한 건조(WD)의 범주에 속하는 가뭄의 경우 지속기간은 대개 1개월을 초과하지 않으며 해당 월의 적은 강우량(약 50 mm 이하)이 주된 원인으로 작용한다. 따라서 유역의 상태가 상당히 습윤한 경우에도 한시적으로 발생했다가 해갈되는 양상을 보일 것이며 연중 어느 기간에도 발생 가능한 것으로 예상된다. 또한 해갈 시점의 강우량은 약 50 mm 정도의 월 강우량이면 충분할 것으로 판단된다. 건조(D)의 범주에 속하는 가뭄은 대부분 선행 및 후속 홍수기 4개월 누가 강우량(금강 유역의 경우 평균



**Fig. 5.** Monthly hyetograph and the corresponding moisture index of Geum river basin.

**Table 4.** Antecedent cumulative rainfalls of the selected drought events

Wet / Dry state	Drought event		Cumulative rainfall		
	No	Moisture index	Jun~Sep	Oct~Dec	Jan~May
SD	④	-418.79	516.25	111.17	342.20
	⑩	-279.64	748.61	106.62	207.22
D	②	-214.74	1142.59	87.90	76.62
	⑨	-193.22	1095.59	85.65	207.99
	⑧	-192.38	1059.27	71.86	149.65
	①	-182.06	873.99	201.51	82.67
	⑥	-181.89	1047.14	122.59	197.28
WD	⑦	-144.33	1059.27	71.86	149.65
	③	-132.14	1142.59	87.90	76.62
	⑤	-131.17	796.46	134.56	313.56
Average during 1998~2007 period			969.11	109.29	203.13

969.11 mm 이상)이 비교적 충분하여 해당 사상의 전후에 발생한 다른 가뭄사상들과는 독립적인 형태로 나타난다. 지속기간은 대개 4~5개월 정도로 주로 겨울가뭄에서 봄가뭄으로 지속되는 경향을 보인다. 선행 홍수기 직후의 3개월(10, 11, 12월) 누가강우량이 비교적 적을 경우(금강유역의 경우 약 100 mm 이하) 건조 상태가 빠르게 진행되어 겨울가뭄이 발생하고 월 평균 강우량이 약 20 mm 이하인 기간이 일정기간 지속되면 봄가뭄으로 발전하게 된다. 해갈 시점의 월 강우량은 약 50~200 mm 정도로 후속 홍수기 누가강우량과 맞물려 유역의 완전한 해갈이 이루어진다. 만약 후속 홍수기의 누가 강우량이 적게 발생하는 경우 해당 사상은 후속 사상에 영향을 주게 되어 강한 건조 상태 가뭄의 원인이 되기도 한다. 강한 건조(SD)의 범주에 속하는 가뭄은 주로 선행 홍수기의 부족한 강우로 인하여 유역이 충분히 해갈되지 않은 상태에서 발생하는 양상을 보인다. 따라서 만약 선행 홍수기 4개월 누가강우량이 예년평균에 비하여 작을 경우(약 50~70%) 선행 가뭄사상보다 심도가 큰 연쇄적인 후속 가뭄사상의 발생빈도가 높아지는 것이다. 또한 홍수기 4개월 누가강우량이 일정량 이상(예년 평균 70~90%)이 되는 경우에도 총량의 대부분이 하절기 장마기간에만 집중될 경우(즉, 초가을 태풍이 상륙하지 않는 경우) 늦여름 폭염과 함께 건조 상태가 빠르게 진행되어 가을가뭄이 발생할 가능성이 높아지게 된다. 이는 겨울가뭄 및 봄가뭄으로 발전하여 상당히 장기간에 걸친 대규모의 가뭄사상으로 이어지게 된다.

**3.4. 경향성 시험결과**

본 연구에서 산정된 기후학적 물수지 성분(Fig. 1) 시계

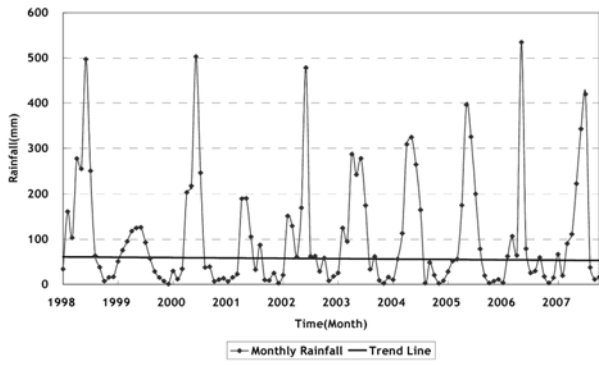
열들에 대한 경향성 시험을 Table 5와 같이 수행하여 보았다. Table 5의 2열은 식 (6)과 같이 정의되는 Seasonal Kendall 통계량이고 4, 5열은 각각 유의수준 및 경향선을 나타낸다. 여기서 우선 주목되는 사항은 1, 2행의 강우량과 증발산량에 대한 시험결과로서 대상기간에 대하여 양자 모두 유의한 경향성을 나타내지 않고 있음을 볼 수 있다. Fig. 6의 (a), (b)는 이들을 각각 경향선과 중첩하여 도시한 것으로 상기한 결과를 시각적으로 확인할 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 본 연구의 대상기간은 대부분 IPCC에서 보고한 1900년 이후 지구 평균기온이 가장 높은 해들에 해당한다. 이는 해당기간에 대한 대기시스템의 변화 가능성을 암시하는 것으로 볼 수 있다. 하지만 Table 5 및 Fig. 6의 (a), (b)에서 이러한 경향성을 감지할 수 없는 것은 주로 본 연구의 대상기간이 갖는 시간적 규모(temporal scale)에 기인하는 것으로 판단된다. 다시 말해서 강우량과 증발산량의 경우 기온의 상승에 따른 경향성의 발현은 보다 큰 규모의 시간 축(예를 들면 50년이나 100년) 상에서 발생할 수 있을 것으로 유추된다.

이상과는 달리 과잉수분, 부족수분 및 습윤지표에 대한 결과에서는 대상기간에 대하여 유의한 경향성이 나타나고 있음을 Table 5의 4~6행 및 Fig. 6의 (c)~(e)로부터 확인할 수 있다. 특히 습윤지표에 대한 결과(Table 5의 6행 및 Fig. 6의 (e))로부터 대상기간 동안 금강유역에서는 상당한 규모의 건조 현상이 진행되어 왔음을 예상할 수 있다. 이는 3.1 절의 가뭄사상에 대한 분석결과와 일치하는 사항으로 대상기간 동안의 잦은 가뭄사상의 발생이 주요한 원인인 것으로 판단된다. 특히 전술한 바와 같이 해당기간에 대하여 강우량과 증발산량은 유의한 변동성을 나타내지 않는바 이러

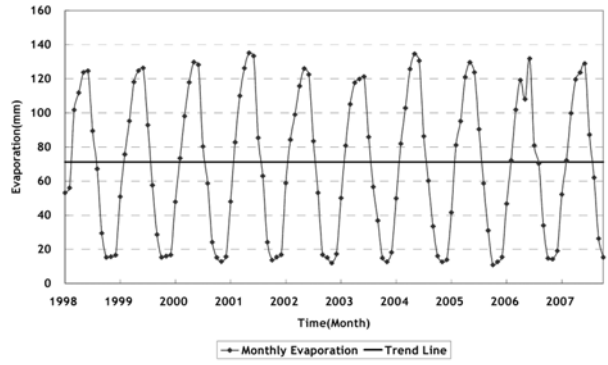
**Table 5.** Results of trend test on climatic water balance components

	<i>S</i>	<i>P</i>	Sig. Level (%)	Trend line
Rainfall	-1.030	0.3031	69.69	$y = 61.37 - 0.8121t$
Evapotranspiration	0.026	0.9789	2.11	$y = 71.24 + 0.0000t$
Surplus water	-1.984	0.0473	95.27	$y = 2.272 - 0.07931t$
Deficit water	3.940	0.0001	99.99	$y = 17.09 + 3.854t$
Moisture index	-3.407	0.0007	99.93	$y = 21.09 - 14.07t$

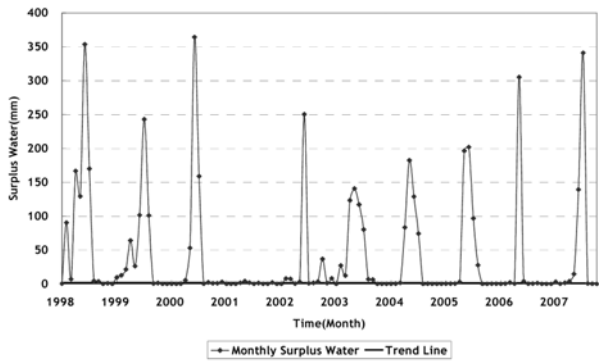
\*  $t = decimal\ year - 1997.75$



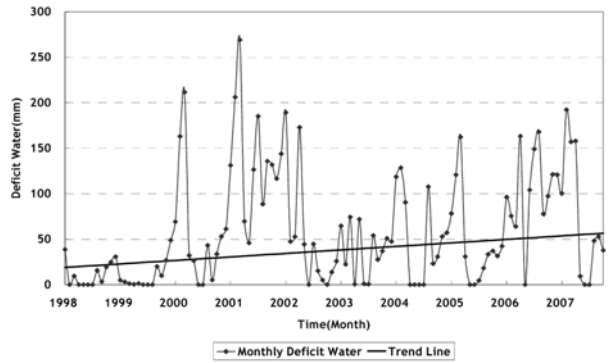
(a) Monthly rainfall time series



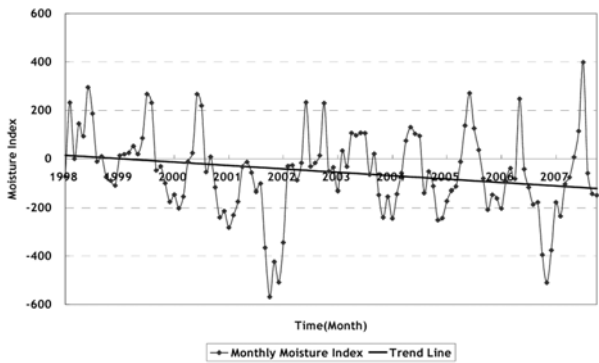
(b) Monthly evaporation time series



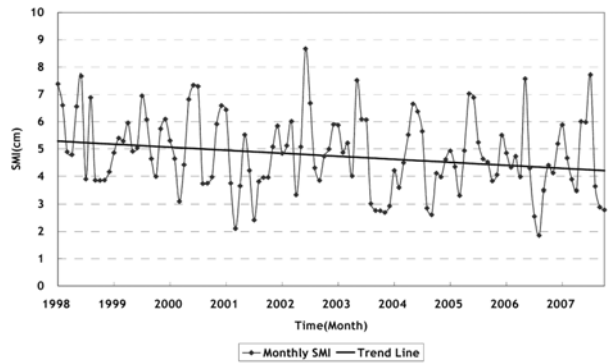
(c) Monthly surplus water time series



(d) Monthly deficit water time series



(e) Monthly moisture index time series



(f) Monthly SMI time series

Fig. 6. Trend analysis results by Seasonal Kendall test.

한 현상의 주된 원인은 토양수분량의 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 현재 우리나라의 경우 강우패턴의 변동에 관한 사안이 자주 보고되고 있다. 연 총량은 다소 증가추세를 보이는 강우는 발생일수의 감소추세로 인하여 시간적 편재현상이 심화되어 가고 있다. 이는 단기 집중호우로 인한 풍수해의 잦은 발생을 시사하는 한편 이전보다 길어진 갈수기의 출현을 암시한다. 이러한 현상을 기후학적 물수지 개념에 따라 유추해 보면 기온의 상승에 따라 잠재증발산량(기후학적 수요량)이 증가하거나 감소되는데 강우 패턴의 변동에 따른 과잉수분량의 감소로 인하여 토양수분량이 증발산을 통하여 고갈되어 가는 것으로 판단된다. 이는 전반적인 물 순환 체계의 변동을 의미하는 것으로 이전과는 다른 계절적 특성의 출현과 함께 가용수자원의 편재현상을

지적하고 있다. 따라서 보다 효율적인 수자원관리를 위해서는 상기한 유역 상태변수들에 대한 지속적인 모니터링과 함께 거동특성의 변동에 대한 분석이 필요한 것으로 판단된다.

Table 5의 결과로부터 추론된 토양수분량의 감소경향에 대한 검증은 위하여 Fig. 4의 SMI 시계열에 대하여 Table 6 및 Fig. 6의 (f)와 같이 경향성 시험을 수행하여 보았다. 흥미로운 사항은 기후학적 물수지 개념과는 별개로 산정된 SMI 역시 유의한 감소 경향성을 나타내는 점으로서 본 연구의 대상기간 동안 상당한 양의 토양수분이 증발산을 통하여 손실되었음을 확인할 수 있다. 이로부터 금강유역의 건조현상을 지배하는 주요한 인자로서 토양수분의 거동을 간과할 수 없을 것으로 판단된다.



Table 6. Results of trend test on SMI

	<i>S</i>	<i>P</i>	Sig. Level (%)	Trend line
SMI	-2.720	0.0065	99.35	$y = 5.338 - 0.1106t$

※  $t = decimal\ year - 1997.75$

#### 4. 결론

본 연구는 기후학적 물수지 방법을 활용하여 금강유역을 대상으로 유역의 습윤·건조 상황의 시계열 분석과 이를 기반으로 주요 가뭄사상을 선별하여 해당 사상들에 대한 각종 수문학적 특성을 분석한 것이다. 우선 월별 습윤지표의 누가확률밀도함수  $P(x)$ 를 이용하여 유역의 습윤/건조 상태를 분류하였다. 기왕 최대치와 최소치에 따라 극한습윤과 극한건조 조건을 정의하여 양자 사이의 구간을 누가확률에 따라 습윤, 정상, 건조로 3등분 하고, 누가확률의 등간격에 따라 다시 3등분 하여 총 9개의 습윤 및 건조 상태로 세분화하였다. 금강유역을 대상으로 습윤지표를 산정하여 앞서 세분화된 조건으로 월별 상황을 분류하고, 건조상태의 지속 상태에 따라 총 11개의 주요 가뭄사상을 선별하였다. 또한 기존에 개발된 장기유출모형에서 도출된 soil moisture index와 산정된 습윤지표를 직접 비교한 결과 유사한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.

선별된 가뭄 중 약한 건조(WD)의 범주에 속하는 경우 지속기간은 대개 1개월을 초과하지 않지만, 건조(D)의 범주에 속하는 가뭄은 대부분 선행 및 후속 홍수기 4개월 누가강우량이 비교적 충분하여 해당 사상의 전후에 발생한 다른 가뭄사상들과는 독립적인 형태로 나타난다. 지속기간은 대개 4~5개월 정도로 주로 겨울가뭄에서 봄가뭄으로 지속되는 경향을 보이며, 월 평균 강우량이 약 20 mm 이하인 기간이 일정기간 지속되면 봄가뭄으로 발전하게 된다. 강한 건조(SD)의 범주에 속하는 가뭄은 주로 선행 홍수기의 부족한 강우로 인하여 유역이 충분히 해갈되지 않은 상태에서 발생하는 양상을 보인다.

또한 기후학적 물수지 성분 시계열에 대한 경향성 분석(Seasonal Kendall 시험법)을 수행하여 최근 10년간 대상유역에서 전개되고 있는 물 순환과정의 변동성을 파악하였다. 과잉수분, 부족수분 및 습윤지표에 대한 경향성 분석결과 전체기간에 대하여 유의한 경향성이 뚜렷함을 확인하였으며, 특히 습윤지표에 대한 결과로부터 대상기간 동안 금강유역에서는 상당한 규모의 건조 현상이 진행되어 왔음을 예상할 수 있다. 이는 가뭄사상에 대한 분석결과와 일치하는 것으로 대상기간 동안의 잦은 가뭄사상의 발생이 주요한 원인인 것으로 판단된다. 상기한 사항은 본 연구의 대상유역인 금강유역에 국한되는 결과로서 향후 다른 유역에 대한 결과와의 비교 검토가 필요한 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

김광섭(2008). 관측자료에 의한 기후변화 수자원 영향의 통계적 평가. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단.  
 김광섭, 임태경(2006). 1973년부터 2004년까지의 관측된 대형증발산 자료 분석. 대한토목학회논문집, 26(6B), pp. 583-596.  
 류경식, 황만하, 맹승진, 이상진(2007). 유역관리모형을 이용한 금강유역 유출특성 해석. 수질보전 한국물환경학회지, 23(4), pp. 527-534.  
 배덕효, 정일원(2008). 기후변화 수자원 영향평가기법 및 한반도 영향평가. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단.  
 신사철, 황만하, 고익환, 이상진(2006). 식생 및 기온정보를 조합한 증발산량 산정을 위한 간편법 제안. 한국수자원학회논문집, 49(4), pp. 363-372.  
 신사철, 황만하, 고익환(2008). 기후학적 물수지에 의한 유역의 건조 및 습윤 상황 감시 기법 개발. 한국수자원학회논문집, 41(2), pp. 173-184.  
 신현석, 김홍태, 박무종(2004). GIS와 GCUH를 이용한 돌발홍수 기준우량 산정의 타당성 검토 연구. 한국수자원학회논문집, 37(5), pp. 407-424.  
 윤용남(1996). 공업수문학, 청문각.  
 이주현, 정상만, 김재한, 고양수(2006). 가뭄모니터링 시스템 구축: II. 정량적 가뭄 모니터링 및 가뭄전망기법 개발. 한국수자원학회논문집, 39(9), pp. 801-812.  
 한국수자원공사(2006). 가뭄관리정보체계 수립 보고서.  
 Haan, C. T. (2002). Statistical methods in hydrology. Iowa State Press, pp. 30-31.  
 Helsel, D. R., Mueller, D. K., and Slack, J. R. (2006). Computer program for the Kendall family of trend tests. U.S. Geological Survey Investigations Report, 2005-5275.  
 Hirsch, R. M., Slack, J. R., and Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research, 18(1), pp. 107-121.  
 IPCC Technical Paper-IV (2008). Climate Change and Water.  
 Legates, D. R. and Mather, J. R. (1992). An evaluating of the average annual global water balance. Geographical Review, 82, pp. 253-267.  
 Tateishi, R. and Ahn, C. H. (1996). Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 51, pp. 209-215.  
 Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38, pp. 55-94.